



TITLE:

地質境界周辺に発生する初生地すべりの危険度判定法に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

久保田, 哲也

CITATION:

久保田, 哲也. 地質境界周辺に発生する初生地すべりの危険度判定法に関する研究. 京都大学, 1992, 博士(農学)

ISSUE DATE:

1992-11-24

URL:

<https://doi.org/10.11501/3064141>

RIGHT:

地質境界周辺に発生する初生地すべりの 危険度判定法に関する研究

1 9 9 2 年

久保田 哲也

地質境界周辺に発生する初生地すべりの危険度判定法に関する研究

目 次

ABSTRACT	1
1. 研究の目的	
1.1 概 説	2
1.2 初生地すべりの特徴	4
1.3 既存の危険度判定手法の研究の状況	8
1.4 危険箇所及び危険度判定基準の基本的な考え方	15
1.5 まとめ	18
2. 地形・地質因子による抽出法	
2.1 概 説	20
2.2 地すべり発生率の算出法	22
2.3 平均勾配の算出法	25
2.4 調査対象地	26
2.5 地質（地層、基盤岩種等）と発生率 S_i	30
2.6 斜面勾配と発生率	35
2.7 地形・地質因子による抽出法	39
2.8 まとめ	45
3. 臨界すべり面解析による手法	
3.1 臨界すべり面解析の流れ	47
3.2 動的計画法を用いた臨界すべり面解析（CSSDP）	47
3.3 CSSDPによる危険箇所抽出法	78
3.4 まとめ	88
4. 総合判定法	
4.1 総合的判定法と危険度区分	89

4.2 現状安全率の信頼性と危険度区分の信頼性	92
4.3 事例のあてはめ	99
4.4 まとめ	114
5. 結 論	115
6. 謝 辞	116
参考文献	117

巻末資料

1. 安定計算を行った事例斜面の縦断面と 探索されたすべり面	1
2. 事例斜面の現状安全率と斜面勾配の関係表	27
3. 斜面形状別現状安全率計算のモデル斜面と 探索されたすべり面	30
4. 新井地区丈ヶ山周辺の高危険度メッシュにおける 臨界すべり面解析結果	38
5. 事例地域の地質・勾配別地すべり発生率の表	99

ABSTRACT

The land development in mountainous area here in Japan is geared towards being wild driven by recent high demands for land use.

In this context, a lot of hillside and mountain side has been developed these days as inhabited districts or mountain resorts which may end up with a ruin in sediment disaster.

Therefore, landslide susceptible area is increasing, and landslide which occurs suddenly without any signs as well as can be found only by their unique topographies seems to be extremely important in order to predict susceptible area.

On this point of view, the standards to pick up the susceptible area based on some topological or geological condition and detective method for this kind of landslide is considered here. And then, a estimation method using the Critical Slip Surface analysis by Dynamic Programming (CSSDP) combined with some standards factor of safety (F_c) gained from a probability density distribution of factor of safety is established.

Since this CSSDP can search automatically a slip surface that has the minimum factor of safety by the dynamic programming theory, although under ground geological and/or geostructural condition is unknown. Needless to say, it can treat not only impact factor triggers landslide but slope nature.

Adding to it, the error which occurs due to the assumption of unknown slope under ground condition (homogeneous slope) can be evaluated by the reliable analysis using under estimation probability of susceptibility ($P(F)$).

Thus, the method gained in this study must be useful to estimate or evaluate the landslide susceptibility.

1. 研究の目的

1. 1 概 説

日本列島は、激しい地殻変動にさらされており、その結果、脆い地質から成る急峻な山地が多い。その一方で、モンスーン気候に属し降雨量が多い上に、地震の多発する地域にもあたるので、このような誘因で発生する土砂災害に極めて弱い体質を持っている。しかも、急激な経済発展の結果として、土地の高度利用に対する要求は、大変大きく、近年、丘陵や山地の開発が進み、土砂災害の危険性は増す傾向が見られる。とりわけ、一度発生すると、被害の範囲が大きく、被災する住民や資産の大きな地すべりあるいは大規模崩壊についての危険箇所や、その危険度を知ることは、適正な土地利用を進めるために必要と考えられるので、その危険度判定手法の確立が望まれている。

一般に、土砂災害は、土砂の移動現象により引き起こされるものであるが、その発生機構や規模、移動のスピードなどから、土石流、地すべり、崖くずれなどに区別されている（表1-1）。この中で、移動する土砂の量や範囲が大きいことから、人命や資産に対する被害の大きいのは、地すべりと考えられる。

さて、まず、以降の議論を理解し易くするために、山地での土砂の移動現象を整理しておくこととしたい。

①土石流は、豪雨時に多量の土砂が水と混合して急な溪流を流下する、あるいは、水を多量に含んだ斜面が崩壊し、そのまま流下する時などに生じるもので、大きな礫を先頭にして流下することが多い上、流速も速いので、その破壊力は大きい。この土石流災害の予測技術は各関係機関、研究者によって鋭意進められている。

また、流下する土砂の量が数百万 m^3 に及ぶ大規模な土石流の発生源として、地すべり土塊が直接流出することによって生じる事例が多く、地すべりや大規模崩壊の危険箇所・危険度を的確に判断できれば、土石流氾濫シュミレーション等の解析手法を併用することで、その場合の被災範囲は推定できると思われる。

②崖くずれは、勾配30度以上の斜面において（中村浩之ら、1985）、風化した地表近くの地層が豪雨等の誘因で突然崩壊するもので、移動の速度が速いため、人命に対する危険は大きい。移動する範囲が1千 m^2 未満（中村浩之ら、1985）と小さいから、被災の範囲も比較的局所的なものとなる。

③地すべりは、勾配30度以下の斜面において（中村浩之ら、1985）、山体のクリープ破壊面に起因する（渡 正亮、1986）すべり面となる特定の地質構造を持つ斜面に生じるもので、通常は地割れなどの前兆現象を伴い、移動の速度も比較的緩慢なので、人的被害は少ない。しかし、移動する斜面の範囲は1千 m^2 以上（中村浩之ら、1985）と大きい。

また地すべりには、構造線や褶曲構造、埋積谷など一定規模の地質構造を持つ斜面に発生し、移動する面積が数十万 m^2 以上に及ぶ、移動の速度の比較的速いものもあり、人命、財産に係わる被災の程度は非常に大きくなり得る。

表 1-1 土砂移動現象の説明

土砂移動現象の種類	移動・発生の特徴
土石流	<ul style="list-style-type: none"> ・山地の谷などに堆積した土砂礫に豪雨により多量の水が補給されたり、水を多量に含む斜面が崩壊を起こし、そのまま流れ下って発生する現象。 ・移動の速度は、時速60km以上にも達する時がある。 ・先端には大きな礫を集中して流れ下ることが多い上、直進性も強いので、その破壊力は大きい。
崖くずれ	<ul style="list-style-type: none"> ・斜面の表層を形成する土壌層や基岩上の風化土層など、地上から厚さ数m以下の土砂が崩壊する現象。 ・勾配30度以上の斜面で、大雨や地震時に突発的に発生することが多い。 ・移動速度は極めて速いので、避難が困難。 ・崩壊する面積は、1千㎡未満と比較的小さい。
地すべり	<ul style="list-style-type: none"> ・一般的に、過去に地すべり発生の経歴のない斜面に初めて生じるものを、初生地すべりと呼び、一度移動した地すべり土塊に、地形の発達に伴って開析谷が侵入し、不安定となって生じる二次的な地すべりと区別している。 この初生地すべりとは、有史以来地すべりの発生が見られない斜面で発生するものを指し、渡（1986）によれば、新鮮な岩盤や弱風化岩盤が断層・破碎帯の影響の下地震や大雨に伴って急速に移動する「岩盤すべり」とされる。 ・山地や丘陵を構成する斜面のうち、キャップロック、褶曲構造、埋積谷あるいは、構造線破碎帯など大規模な地質構造に伴う不安定な素因を持つ斜面で発生する。再移動型の地すべりでは通常粘土層より成るすべり面を持つことが一般的である。 ・再移動型の地すべりでは移動速度は緩慢で、一日数cm程度の場合もあり、避難は比較的容易。しかし、初生地すべりでは、移動速度は極めて速いので、避難が困難。 ・移動する面積は、数千㎡から数十万㎡以上にも達し、非常に大きく、被災する範囲も大きくなる。 ・発生後は大きな土石流となって流下する場合もある。 ・再移動型は、勾配30度以下程度の斜面で頻発する。

この被災の程度が大きい地すべりの中でも、特に、過去に移動したことの無い斜面で初めて発生する「初生地すべり」と呼ばれるものは、次のような特徴を持ち、危険箇所や危険度の判定が困難とされる。

a. 初生地すべりとは、有史以来地すべりの発生していない斜面で発生するもので、渡(1986)によれば、新鮮な岩盤や弱風化岩盤が断層・破碎帯の影響で脆弱な部分を持ち、地震や大雨に伴って急速に移動するものとされる。

b. 等高線の乱れや滑落崖、残土丘などの地形的特徴が見られず、発生前には、航空写真判読などによる発生危険箇所の判別が難しい。すなわち、地質構造や地形から、発生の危険性はある程度推定できるものの、どの斜面が危険なのか特定できない。

c. 発生履歴のない斜面に起きる初生地すべりは、後述するように発生する地すべり全体の40~60%の頻度を占めており(中村浩之ら、1985)、二次的に再移動する可能性のある危険箇所を判別しても、完全とは言えない。

d. これらは、一度発生すれば、その規模や運動量の大きいことから、緊急の対策工による制御が困難となるので、被害は大きいものとなる。従って、発生する前、あるいは、大きく移動する前に危険箇所を発見し、避難体制を整えたと共に、発生の抑止に努める必要がある。

以上のように、初生地すべりは地すべり土塊の再移動や部分的二次移動による地すべりに比較しても発生の頻度が比較的高い上、その規模が大きく、発生場所の予測が難しいため、被害も大きくなる。つまり、社会的なインパクトが大きいので、これら初生地すべりに対する危険箇所を判別し、危険度を判定することは土砂災害を防止する上で極めて重要と考えられる。

ここでは、地形・地質要因による危険箇所判別と臨界すべり面解析法を使用した危険度判定を組み合わせ、これら初生地すべりの危険箇所判別及び危険度判定の手法(図1-1、後述)を提案し、あわせて、その基準となる勾配・地質を用いた基準発生率や、基準安全率を提案することを検討する。

一般に、地すべりは、①地質構造のうち破碎されすべり面を形成しやすい構造線破碎帯や褶曲軸、②貫入応力による破碎や熱変成によりすべり面を形成しやすい貫入岩周辺斜面、③多孔質のキャップロックから地下水が供給され発生が促進されるキャップロック等の周辺斜面などで、多く発生するとされているが、本論文においては、従来から研究例も少なく、危険度判定が実行されることの少なかった貫入岩やキャップロックの周辺斜面、特に、発生頻度が高いとされる第三紀層における、これらの斜面に着目し、初生地すべりを対象とした危険度判定法を提案することを目的とする。

1. 2 初生地すべりの特徴

ここでは、前述した初生地すべりの特徴をもう少し詳しく検討して行くことにする。

1.2.1 初生地すべりの発生頻度

1985年7月の長野市地附山地すべりや、1984年9月の長野県西部地震で発生した

御岳崩れの地すべり、その他歴史に残る地すべりは、そのほとんどすべてが、それまで発生履歴のない斜面に生じたものとなっている。昭和60年の建設省の調査によれば、昭和57年、58年に発生した地すべりの中で、特に被害が大きく、かつ解析に必要な資料の整備されているもの40箇所に対し、航空写真判読を行なった結果、そのうち約40~60%が地すべり履歴のない初生地すべりと判断された。

この調査では、昭和57年、58年に発生した地すべりのうち、40箇所の発生前の航空写真を用い、地すべり地形あるいは地すべりの徴候と、断層などの地すべりと関連の深い地形を判読している。用いた写真の縮尺は1万分の1から2万分の1の精度であり、地すべり判読には十分とされるものを用いている。

判読要因は、次のものである。

①地すべり発生の素因となり得る断層やそれに類する地質的弱線であるリニアメントの有無。

②土砂の移動の特徴あるいは地下の弱部を示す河川・溪流など水系の異常な曲がり（水系異常）。

③地すべりやがけ崩を生じた形跡。

④斜面が移動し始める特徴である斜面上の地表のクラック（割れ目）の存在や土砂が斜面下方の河川や道路に押し出した形跡。

⑤斜面が移動しつつある時に生じる森林の衰弱や樹種の変化など植生の異常。

⑥地すべりの跡地であったり、発生しやすい場所であることを示す斜面上の遷急線の存在など。

このうち、③は発生危険度に対し明確かつ重要な項目であるが、④もかなり重要な判読要因となる。

更に航空写真だけでなく、国土地理院発行の地形図（縮尺2万5千分の1）や、周辺の地質図ならびに地質資料も参考にした。

判読結果の判定基準は、下記の要領で行った。

①上記の①～⑥の項目の内、判読該当項目数が4つ以上と多く、かつ地すべりの特徴が明確なものは地すべり跡地の二次移動と判定可能（総合判定A）。

②判読該当項目数が4つ以上と多くても、各項目が不明瞭なものは地すべり跡地の二次移動と判定困難（総合判定B）。

③地すべり地形、クラック、押し出しなどの項目が2つ以上あり、かつ明確であれば地すべりの危険性が大とされるので地すべり跡地の二次移動と判定可能（総合判定A）、不明確であれば判定困難（総合判定B）とした。

④明確、不明確は複数の判読者が判断できたものについて明確、そうでないものは、不明確とした。

2) 判読結果

判読結果を表1-2に示してある。これによれば、地すべり発生前の状況から、地すべり跡地の再移動（表1-2中総合判定のA）と判定できるものが16箇所あり、40箇所中の40%を占めている。残りは、判定困難（総合判定B）が11箇所、地すべりの前兆現象なし（総合判定C）が13箇所となっている。この総合判定BとCに属する地すべり（40カ所中の60%）が、初生地すべりと考えられる。

表1-2 (その1) 地すべり発生前の空中写真判読結果

対象 番号	場 所	災 害 年 月 日	空中写真	撮影年月	1/25,000 図 名	地 質	地 す べ り の 諸 要 素										総 合 判 定
							リニア メント	水系異常	地すべり 地 形	フラック	押し出し	植生異状	斜面の植 被変化点	付 近 の 異状地形	全く新規 に 発 生	過去の地 すべり経歴	
101	北海道浦河郡浦河町大通地区	S.57 3.21	CHO	S.10.8 78-18 11.3	浦 河	白 帯 紀 堆 積 岩 類									○	○	C
501	秋田県由利郡東由利町祝地区	S.58 4.2	CTO	S.51.9.26 76-9 11.7	老 方	中 新 統 の 火 山 噴 出 物	○	○	○		○		○	○			A
502	秋田県山本郡八竜町芦崎地区	S.58 5.26	TO	S.55.8.5 80-2X 9.19	大 崎	完 新 統 の 砂 丘									○		C
508	秋田県平鹿郡山内村平野沢字中島	S.56 4.11	CTO	S.51.8.12 76-8 11.6	橋手 羽後黒沢	中 新 統 新 統 の 堆 積 岩 類			○	○	○		○	○		○ △	A
512	秋田県由利郡矢島町荒沢針ヶ岡地区	S.56 10.9	山832	S.53.8.20 9.8	矢島 川辺	中 新 統 新 統 の 堆 積 岩 類	○		○		○		○	○			A
702	福島県伊達郡梁川町大字大間鹿ノ子地区	S.59 3.3	83-8	S.58.5.15 10.26	保 原	中 新 統 の 火 山 砕 屑 物	○			○					○		B
801	茨城県那珂郡山方町野上沢地区	S.58 11.14	山937	S.56.6.3 10.17	山 方	中 新 統 の 堆 積 岩 類	○	○		○				○			B
802	茨城県那珂郡山方町諸沢沼の人地区	S.57 4.6	山937	S.56.6.3 10.17	山 方	中 新 統 の 堆 積 岩 類			○		○		○	○			B
806	茨城県久慈郡金砂郷村大字赤土地地区	S.55 6.20	山760	S.51.5.24 28	山 方	中 新 統 の 堆 積 岩 類			○		○		○			○	B
1002	群馬県太田市北金井地区	S.57 9.12	CKT 80-1	S.55.9.30 10.22	桐 生	中 新 統 の 火 山 砕 屑 物			?				○		?	○ △	B
1003	群馬県安中市東上秋間字長岸地区	S.56 8.23	山808	S.53.5.23	三ノ倉	更新～完新統 火 山 噴 出 物		○	○	○	○		○	○			A
1601	富山県氷見市針木地区	S.58 1.6	CB 82-1X	S.57.5.15 6.12	氷 見 能登二宮	第 三 紀 新 統	○		○				○	○		○	A
1906	長野県小諸市富士見平地区	S.57 8.6	CB 81-4	S.56.6.3 28	小諸 車坂峠	完 新 統 の 火 山 砕 屑 物			○				○	○		○ △	B
2111	静岡県庵原郡富士川町中ノ郷地区	S.55 6.9	CB 78-4X	S.53.7.23 8.23	蒲原 吉原	更新～完新統 火 山 噴 出 物							○		○	△	C
2201	愛知県知多郡美沢町上前地区	S.57 8.3	CCB 77-17	S.52.9.28 11.24	河 和	鮮 新 統 未固結堆積物			○	○	○		○			○ △	A
2203 2205	愛知県新城市多方野地区	S.57 8.3	82-17	S.57.5.13 6.5	三河富岡	結 晶 片 岩 類	○	○	○	○	○						A
2303	三重県熊野市井戸町瀬戸平六谷地区	S.55 4.27	CKK 76-7	S.51.10.21 52.3.8	木 本	第三紀火砕岩	○		○	○			○				B
2401	福井県福井市下光(上光、下光)	S.54 10.1	山774	S.52.5.17 18	越前蒲生	第三紀火砕岩	○		○	○			○	○		○	A
2403	福井県丹生郡清水町竹生地区	S.55 8.22	山774	S.52.5.17 18	福 井	第三紀火砕岩									○		C
2601	京都府相楽郡和束町日新地区	S.58 6.21	CKK 74-7	S.50.1.24 7	笠置山	花 崗 岩 類	○		○	○			○	○			A

○=同一箇所
△=周辺箇所
(その1)表-8

表1-2 (その2) 地すべり発生前の空中写真判読結果

対象 番号	場 所	災 害 年 月 日	空中写真	撮影年月	1/25,000 図 名	地 質	地 す べ り の 誘 発 素										総 合 判 定
							リニア メント	水系異常	地すべり 地 形	クラック	押し出し	植生異状	斜面の植 被変換点	付 近 の 異状地形	全く新規 に 発 生	過云の地 すべり経歴	
2701 2704	大阪府柏原市旭ヶ丘地区	S.57 8.3	CKK 79-2	S.54.9.11 11.20	大和宮田	第三紀火砕岩			○	○			○	○	○		B
2703	大阪府八尾市教興寺地区	S.57 8.3	CKK 79-3	S.53.9.11	信貴山	花 崗 岩 類	○		○	○	○		○	○			A
2806	兵庫県美方郡村岡町村岡福西	S.56.3 ~4月	CKK 76-2	S.51.10.3 11.22	村 岡	第三紀 砂								○	○		C
2906	奈良県山辺郡山添村大字助命地区	S.55 7.12	山747	S.51.9.25 10.22	名 張	花 崗 岩 類	○		○	○				○	○		B
3005	和歌山県橋本市大字清水地区	S.57 8.3	山905	S.55.6.4 5	橋 本	変成岩類	○	○	○	○	○		○			○	A
3201	鳥根県色智郡桜江町三田地区	S.58 7.23	CG 76-5	S.51.10.22 12.4	川 口	玄武岩安山岩 質火砕岩	○							○	○	△	C
3202	鳥根県那賀郡三隅町上古和桑原地区	S.58 7.23	CG 82-2X	S.57.4.25 6.4	宇津川	泥 質 片 岩								○	○	○ △	C
3203	鳥根県浜田市穂出町中場地区	S.58 7.23	CG 76-9	S.51.8.18 52.1.9	浜 田	泥 質 片 岩				○					○	△	B
3204	鳥根県那賀郡三隅町中組地区	S.58 7.23	CG 82-2X	S.57.4.25 6.4	三 隅	泥 質 片 岩	○								○		C
3207	鳥根県益田市桜ヶ丘地区	S.58 7.23	CG 82-2X	S.57.4.25 6.4	益田 石見橋田	中新統の頁岩	○						○		○	○ △	B
3212	鳥根県松江市西川津町堤本尻地区	S.56 6.29	山907	S.55.6.10 12	松 江	中新統の砂岩	○			○					○	○	C
3402	広島県比婆郡口柏町宮内大草地区	S.58 7.23	CG 83-25	S.58.5.9 10	比 和	成 鉄 岩 質 火 砕 岩	○	○	○	○	○		○	○		○ △	A
3407	広島県世羅郡甲山町馬崎地区	S.55 9.1	CG 74-5	S.50.1.20 4.11	本 郷	成 鉄 岩 質 火 砕 岩			○		○		○	○			A
4206	長崎県西彼杵郡岸町村松郷	S.57 7.23	KU 80-2	S.55.5.27 8.1	長 崎	更新~完新統 の火山噴出物			○				○				C
4208	長崎県長崎市滑石町一丁目	S.57 7.23	KU 80-2	S.55.5.27 8.1	長 崎 西 北 部	更新~完新統 の火山噴出物				○			○				C
4209	長崎県彼杵郡大瀬戸町雪平物山手地区	S.57 7.23	KU 77-3	S.52.5.18 1.23	彼 杵	変成岩類	○		○		○		○	○			A
4301	熊本県天草郡大矢野町島島地区	S.58 5.4	CKU 74-18	S.50.1.14 3.31	須 川	更新~完新統 の火山噴出物				○	○		○	○		○	C
4302	熊本県天草郡北町仁田平地区	S.57 5.29	山873	S.54.5.19 1.29	天草下田 天草宮岡	古第三紀砂	○	○	○		○		○	○			A
4303	熊本県芦北郡芦北町黒岩嶺地区	S.57 7.25	山915	S.55.5.19 1.22	田 浦	古生代三畳紀 砂岩粉砂岩等	○						○	○			C
4305	熊本県本渡市志村町倉田東土地区	S.57 7.24	山873	S.54.5.19 1.22	本渡 大島子	古第三紀砂	○	○	○				○	○			A

○=同一箇所
△=同辺箇所
(その2)

このように、初生地すべりは、上記の調査では約60%であり、地すべり全体に相当な比率を占めており、初生地すべりを判定し得る手法が確立されない限り、地すべり危険箇所及び危険度判定手法は不完全なものであり、その判定精度も低いものに止まる。

1. 3 既存の危険度判定手法の研究の状況

1. 3. 1地すべり危険箇所マッピング手法の分類

地すべり危険箇所のマッピング手法の考え方は、大きく分けて次のように考えられる。

1) 判定手法から分類すると、直接法と間接法に分けられる。

①直接法 (direct mapping ; A. Hansen, 1984)

地すべりの分布状況を知って、それらの多く分布する区域のみ危険として危険範囲を決める。

②間接法(indirect mapping ; A. Hansen, 1984)

地すべりの分布とは関係なく、勾配、地質、土質等の素因のみにより危険範囲を決定する。

2) 災害危険度予測図には、Hazard map と Risk map が考えられる。

①Hazard Map (地すべり災害目録図)

過去、現在、未来における、地すべりの発生分布・確率、地すべり運動の特徴、土質、地質等を記したもの。つまり、地すべりの発生危険度のみを対象とする。

②Risk Map (地すべり被害予測図)

地すべりの危険にさらされている面積や人口ならびに社会的ダメージ、構造物や人的被害について記したもの。

すなわち、予想される地すべり土塊の到達距離、濫乱面積と、その区域に含まれる資産、人命等を示し、地すべりの発生と、それによる被害の程度まで対象とするもの。

本論文で対象としている初生地すべりは、地すべり跡地の侵食に伴って谷が発達する開析によって、不安定斜面が生じ、発生する2次移動ではないから、地すべり跡地の分布状況のみから危険度を判別する1. ①の直接法は適当ではない。また、調査対象による分類を見ると2. ②のように危険にさらされる面積等を記したRisk Mapを作成することが、最終的には土砂災害対策上重要であるが、これは防災行政上の課題であり、ここでは触れない。本研究では、まず、危険箇所とその危険度を調べる手法の確立を目指し、そのために、既存のHazard Map (地すべり分布図) を利用するにとどめる。しかし、これらHazard MapやRisk Mapを作成する際の各研究手法は、本研究を進める上で、大きな参考となるので、以下において、これら調査手法について検討を加える。表1-3には、主な既往手法の一覧が示しており、表中の分類欄は、直接法、間接法ならびに、Hazard Mapと RiskMapの区別を示す(表の脚注参照)。

以下に、すでに公表されている手法を簡単に述べる。これら各手法の地すべり危険度判定上の大きい問題として、対象とする斜面の数が非常に多いことが挙げられる。すなわち、数多い斜面群のすべてに詳細な調査解析は不可能であり、すべての

斜面について簡単に得られる情報のみで危険度ランクを付して行こうとする苦心が見られる。

1.3.2 既往の手法の概要

1) 田中の手法(田中耕平、1982)

これは、静岡県伊豆地方周辺における地震による地すべり(landslide)危険度を示したもので、無限長斜面モデルを使用した安定計算方法を種々の勾配・風化土層厚を持つ斜面に適用し、簡便な安定計算を行うことにより危険度の評価を行うものとなっている。各斜面の土質定数と風化土層厚を調査し、あるいは推定することによって、安全率が判明する。風化土層が崩壊する表層崩壊に適用できる手法と考えられる。

2) Wardらの手法(T. J. Ward、1978)

田中の手法とほとんど同様の無限長斜面モデルを使用した安定計算方法により、与えられた斜面形状、地下水位、土質定数に対し、各斜面の安全率を算出する方法であるが、使用する土質定数の斜面内の空間的ばらつきを確率論的に取り扱い、特定斜面の安全率と、それ以下となる確率を与えている。従って、斜面が不安定となる確率も与えられるので、危険度の判断がより正確となる。しかし、田中の手法と同じく、風化土層厚を知って、その下部をすべり面と仮定するなどすべり面のデータが必要であるので、すべり面が深く、基盤岩中でもすべりを生じる地すべりには適さないと思われるが、土質定数の確率分布を与えて求めた安全率に統計的な意味を持たせようとする苦心が見られる。

3) ~5) Radbruchの手法、Brabbの手法、及びNilsenの手法(H. Radbruch、1971、E. E. Brabb、1972、T. H. Nilsen、1975)

これらの手法は、いずれも、航空写真判読や現地調査より認められた地すべりの分布を基に、その面積と斜面勾配(傾斜)、発生の多少を示す手法で、直接法の典型的なものである。間接法で用いる素因や誘因の因子を決定するのには使用できるが、直接初生地すべりの危険箇所や危険度を示すものではない。

6) California州の方法(CDMG、1971)

この手法は、勾配、地質など素因と降雨などの誘因を基に、地すべりが生じやすい地形・地質を有する斜面をピックアップし、危険度をそれぞれの要因の重要度によって付してゆくもので、間接法のオーソドックスなタイプのものと言える。しかし、斜面の単位が大きいので、地すべりの危険度の高い斜面が大きな面積で与えられ広い範囲の危険度判定には適するが、精度が十分でない場合もある。

7) Jacobacciの手法(M. Jacobacci、1974)

航空写真判読により地すべりの分布を知り、地すべりの分布している場所を不安定な斜面として、4つの危険度ランクのうち最も危険度の高いランクを割りあてるもの。その他の3ランクについては、斜面勾配や地質そして波状地形・陥没地形等の地勢によりランク分けを行う。

また、前出のCalifornia州の方法と同じく、斜面の単位が大きく、危険範囲が大きな面積で示されるので、広い範囲の危険度判定に適する。

表 1 - 3 既往地すべり危険度判定手法一覧

No	名 称	対象地	分 類 D/I H/R	調査検討手段	調査要因もしくは基本 判定因子等	危険度 ランク数	成 果	備 考
1	田中の手法	静岡県 伊豆地方	I H	勾配、風化土層厚、土質定数を調査し、無限長斜面モデル簡易安定解析により検討。	勾配、地質、安全率。	3	地震による地すべり崩壊発生危険箇所図（表層崩壊に適用）	1982.
2	Wardらの手法	カナダ各地	I H	勾配、土質定数、地下水位、無限長斜面モデル簡易安定解析と信頼性解析により検討。	勾配、土質定数、安全率、安全率の確率分布。	—	安全率 F_s とそれ以下の確率分布図。	1978.
3	Radbruchの手法	USAカリフォルニア州各地	D H	航空写真判読、現地調査。	傾斜、降雨量、表層地質、地すべり発生頻度。	6 (1~6)	危険度ランク分けをした崩壊発生頻度図(1/50,000)。	1971.
4	Brabb(USGS)の手法	USAカリフォルニア州サンマテオ郡	D H	地質図と崩壊分布図の机上検討。	傾斜、地質、地すべり面積。	7 (1~L)	地すべり崩壊発生危険度分布図(1/62,500)。	1972.
5	Nilsen(USGS)の手法	USAカリフォルニア州コントラコスタ郡	D H	地質図と崩壊分布図の机上検討。	傾斜、地質（土質）、地すべり面積、誘因（降雨および地震）。液状化も考慮。	6 (1,1A~5)	主として地震による地すべり・崩壊発生危険度分布図(1/125,000)。	1975.
6	California州の方法	USAカリフォルニア州全域	I H	地質図、地形図等の検討	斜面の誘因（傾斜、植生の種類・密度・分布・表層土の種類と分布、基岩のタイプ、地すべり分布）、 <u>外因</u> （降雨量・強度、山林火災分布）、 <u>特別な“Z”</u> （膨張性粘土の存在、流れ盤、断層、地下水位の高い所など）。	3 (A~C)	データ・ベース等。	1971. 限界斜度以上はすべてCランク、Z要因の地区は他の地区より1ランク上げる。
7	Jacobacciの手法	イタリア各地	D H	航空写真判読と地質図等の検討	傾斜、地質、地勢（陥没地形、背斜・向斜軸、断層、石灰岩地帯、地すべり地帯等）	4 (細分14)	斜面安定図	1974. 地勢のウエイト付けに問題あり。
8	川上らの手法	長野県北部土尻川流域・犀川流域	D H	地すべり分布図、地形図、地質図の検討（メッシュ図の作成等）、数量化2類	谷密度、標高、傾斜、地層、地質構造。	6 信頼性で区分	判別解析結果、地すべり危険度分布図。	1984. 未だ、試験段階。標高は、他の地域では関係の無い場合もある。
9	藤田の手法	高知県かきつ地区（結晶片岩地帯）	— H	地すべり分布図、地形、地質図の検討（メッシュ法）、相対頻度の検討	勾配、地質（岩種）	—	地質（岩種）別の各勾配ランクにおける地すべり発生相対頻度グラフ。	1980.

No	名 称	対象地	分 類 D/I H/R	調査検討手段	調査要因もしくは基本 判定因子等	危険度 ランク数	成 果	備 考
10	Hong Kong G.C.O.の 方法	香港島お よび九龍 地区	I R	地形図、地質図、地 形区分図の検討	勾配、土質、水文条件、地形（荒廃 状況、谷地形、地すべり地形等。）	4 (GLUM1 ～4)	GLUM(Geotechnical Land Use Map;総合 的土質工學図)と安 定解析との比較結果	1984. 土地規制用。
11	West Virgi nia州の方 法	USA ウエスト・バ ージニア州7 地域	- H	地すべり分布図、地 質図、地形図の検討 。相対傾度による危 険度評価。	地層（基盤黒層）、勾配、土質、地 すべり分布。	3 (低～大)	各黒層、勾配、土質 毎の地すべり発生相 対傾度図。分布図は 無い。	1983.
12	Keeferらに よる地震に 対する手法	USA サンフランシスコ とその周 辺（サンクト 地区）	I H	世界の地震時地すべ りを解析、発生し易 い地形・地質・地す べりタイプを検討。	勾配、地質、土質。	3	地震時地すべり・崩 壊・土石流危険地帯 分布図、発生土砂害 判定表。	1979.
13	Bonnardら の手法	スイス連邦 各州	D H,R	地すべりタイプ別の 移動速度や地質調査 結果の検討。航空写 真の応用。地すべり 土塊特性の検討。	地すべり移動速度の変化率、地質、 移動土塊厚さ、主観的発生確率。	5 (Proc 1 ～5)	発生確率図、州・郡 単位の警告図(1/25, 000)、各地区毎の危 険度管理図(1/5,000)。	1984. 土地利用規制・警 戒避難用。
14	France ZER MOSの手法	フランス各地	D H	地すべり分布図、地 形図、地質図の検討 。	岩質、地質構造、勾配、地形、水文 条件、地すべり履歴等。	2～3 (細分7)	地すべり危険区分図 (1/25,000)	1977. 試験段階で、種々 のものを試作。
15	Carrara & Merendaの 手法	イタリア カラブリア地 方	D H	航空写真判読や現地 踏査、地形図・地質 図の検討。	地すべり分布、地質構造、地層、岩 種、斜面地形、植生、勾配、移動速 度、地すべり平面形、地すべり履歴 、水文条件等。	なし	地すべり目録（分布 図）、デ・チ・ベ・ス (1/25,000)。	1978. 危険度は示されて いない。
16	Czecho-Slo vakiaの方 法	チェコスロバ キア各地	D H	現地調査と資料解析	地すべり分布、地すべりの年代・活 動度、土地利用、水文条件、地すべ り規模、地質、勾配、地質構造等。	なし	地すべり目録（分布 図）、デ・チ・ベ・ス。	1977. 危険度は示されて いない。
17	Scandinavi a & Canada における手 法	スウェーデン、 ノルウェー、 フィンランド各 地	I H,R	地すべり発生履歴、 粘土の存在、勾配、 地形の検討。	粘土やクイック・クレイの存在、岩種、勾配 、斜面高さ、地下水圧。（主として 勾配と斜面高さを考慮。）	2～6 種々	勾配・斜面高さや地 すべり発生頻度の関 係ならびに安全率。 危険度分布図、土地 利用規制図(1/50,00 0)。	1984. 北欧やフィンランド特有の クイック・クレイに対する もの。
18	New Zealand 公共事業省 の方法	ニュージーラン ド全土	D H	詳細不明	地質、勾配、地形、土地利用、岩種 地すべり分布、マス・アメント分布（タイプ 別）。	5 (全国図) 7 (地域図)	マス・アメント分布図お よび侵食強度分布図 (1/250,000 ～ 1/63,380)、 デ・チ・ベ・ス。	1984.
19	Kienholz (Nepal M.H M.P)の手法	ネパールの北 部地区	- H	既存資料と既往災害 の検討：分布図・論 理樹(logical tree)	基盤岩種、流盤・変盤、堆積物厚さ 斜面長、勾配、地形、水文条件、土 地利用、植生、岩種別限界勾配。	3 (Deep,Sha llow,No)	論理樹(logical tre e)によるHazardアス セス手法。	1985. 的中率は、発生87 .3、非発生84.4%

No	名 称	対象地	分 類 D/I H/R	調査検討手段	調査要因もしくは基本 判定因子等	危険度 ランク数	成 果	備 考
20	青山・北村 の手法	鹿児島県 桜島	I H	地形図・地質図等資 料解析、数量化理論 3類による分類と評 価。マップ図使用。	標高、等高線密度、起伏量、谷密度 斜面縦断・平面形、地質、地被物（ 植生、土地利用）。	4 (0～3)	数量化理論3類によ る危険度分類、地す べり・崩壊危険度分 布図。	1984.
21	Nguyenの 手法	—	- H	既往資料（災害資料 や地質・地形図）を 検討、fuzzy理論を 用いて、危険度を判 定。	標高、等高線密度、起伏量、谷密度 斜面縦断・平面形、地質、地被物（ 植生、土地利用）を試験的に使用。	4	Fuzzy理論による あいまいな表現を含 めた危険度の評価。 理論のみ。	1985. 研究段階。

注) D: Direct Mapping＝直接法、I: Indirect Mapping＝間接法、H: Hazard Map、R: Risk Map。

8) 川上らの手法 (H. Kawakami, 1984)

この手法では、まず、長野県土尻川および犀川流域について、地すべりの分布図を作成し、その分布斜面における勾配や地質因子などをメッシュ図によりメッシュ毎に求め、地すべりの分布するメッシュとそうでないメッシュの判別を数量化Ⅱ類より実行する。その後、その判別可能性の程度から地すべりの相対頻度（発生率）によるランク付けを実行した。

この数量化Ⅱ類の解析に用いる要因としては、谷密度、標高、勾配、地層や褶曲軸などの地質構造を考えており、判別解析がうまくできた場合には有効な手法と思われる。また、判別の信頼度も与えている。

9) 藤田の手法 (T. Fujita, 1980)

四国地方、特に高知県の結晶片岩地帯において、地すべり分布状態と勾配・地質（岩種）を用いて危険度を判定しようとするもの。500m×500mメッシュに地形図を区分し、ホートン法（後述）から平均勾配を算出、勾配別・岩種別の地すべり発生率（相対頻度）を出している。間接法の基礎資料とするものであるから、危険度ランク分けはなされていない。地すべり斜面の危険度判定に用いる要因の参考となるものと考えられる。

10) Hong Kong G. C. O. の方法 (K. A. Styles et. al., 1984)

香港の都市計画および地域開発計画等の規制・制限区域の設定や開発時の詳細調査の必要性を評価するため、地すべり・崩壊に対する危険度を、侵食の進行度・地形・地質より総合的に判定する。間接法に属する。

使用される要因は、勾配、斜面形、地質であり主として勾配と地すべり・崩壊の履歴等の地形要因で危険度区分を行っている。サンプル斜面に対し簡便Janbu法による開発前後の安定解析を実行し、危険度ランクの妥当性を検討している。

ただし、基岩がほとんど花崗岩により成る、限られた香港の地域に適用するため、地質構造や地質そのものより、勾配と地形に重点が置かれている。

11) West Virginia 州の方法 (Lessing, et. al., 1983)

米国West Virginia 州の地すべり地帯における地すべり危険箇所と危険度の評価を目指すもので、使用する要因は地層（累層）と勾配、表層土質であり、これらと地すべり分布調査によってあらかじめ求めた発生率を比較し、これらの各要因別に発生率の高いものを検討した上、発生率の高い（相対頻度1.5以上の）要因の数によって危険度ランク分けをしている間接法である。使用される要因がシンプルなもので、実用性は良い。危険度判定の単位斜面が広いので、広い範囲の危険度判定に適すると考えられる。

12) Keeferらによる地震に対する手法 (D. K. Keefer, 1979)

この手法は、San Franciscoとその周辺地区の地震による土砂移動（マス・ムーブメント）の危険度を知る目的で、世界における過去の地震による地すべりのデータを解析し、発生し易い土砂移動のタイプと地形・地質を示したものとなっている。

使用される判定要因は、勾配と地質・土質のみでシンプルな点で実用性は高い。マグニチュード8.6～5.7の地震時における地すべり発生率より求めた “ Critical

Angle（限界勾配）”（ 35° ）と地質や土質を組み合わせている。

つまり 35° 以上では崩壊に近いものが生じ、それ以外の勾配では地質・土質に応じて地すべりや土石流などが生じる危険性があるとしている。初生地すべりも対象とする間接法の代表的な例である。

13) Bonnardらの手法 (Ch. Bonnard et. al.、1984)

Swiss連邦州政府が都市計画や郡部の開発計画に際して、開発行為を規制し、適正な計画を樹立するための資料として作成した手法で通称D U T Iプロジェクトの下で作成された。この手法は、2つの手法からなっている。使用される要因は、地すべりの移動速度の変化、地質、移動土塊の厚さと発生確率の組み合わせで、第一の手法においては、移動速度の変化傾向別に発生の確率を定め、それらの確率により危険度判定をする。これは限定された地域に適用する手法となる。第二の手法は、地すべり履歴と地形・地質の状況より専門家が縮尺1/25,000の地形図に相当する現場毎に、詳細調査の必要性を決定していくものとなっている。本手法は、やはり直接法に属するもので地すべりの存在が前提となっている。また、手法の2は試行中でどのような要因で専門家が危険度を判定するのかは定まっていない。

14) France ZERMOS プロジェクトの方法 (ZERMOS. Project, 1977)

Franceで試験的に行われている種々の直接法のことで、まず地すべり目録図を作成し、その際、岩質や勾配などを要因として併記することで、将来の地すべり危険区分図を作成しようとするもの。現段階では、危険度判定の基礎となる地すべり目録図作成手法の検討にとどまっており危険度判定はなされていない。

15) Carrara & Merendaの手法 (A. Carrara et. al. 1976)

この手法は、ItalyのCalabria地方に関する地すべり目録図（分布図）を作成する手法を検討しているもので、この分布図にどのような地形・地質情報を盛り込み、危険度判定に役立てるかを検討するもので、危険度判定はこの段階ではなされない。

16) Czecho-Slovakiaの方法 (J. Pasek et. al. 1977)

これは、地すべり分布とその発生年代や活動度、その規模、周辺地質、勾配、地質構造と土地利用状況や水文条件を調べ、地すべりとそれに関連する項目の目録図を作成するもので、上述のCarrara & Merendaの手法と同じ段階のものである。

17) Scandinavia & Canadaにおける手法 (L. Viberg, 1984)

Scandinavia半島やCanadaでは、クイック・クレイと呼ばれる流動性の高い粘土が存在し、これが、地すべりの大きな原因となっているので、これに注目し、クイック・クレイの分布、岩種、勾配、斜面の高さや地下水位などから地すべり発生危険度を判定する間接法による手法となっている。

主として用いるのは、クイック・クレイの分布と勾配、斜面の高さであり、クイック・クレイの存在する地方には有効な手法となっている。

18) New Zealand公共事業省の方法 (NZGS, 1984)

これも地すべり（マス・ムーブメント）の目録図を作ろうとするもので、15), 16)の手法と同様マス・ムーブメントの分布とその種類（地すべり・土石流等）地質、勾配、地形、土地利用などの情報をまとめるもの。危険度判定はなされない。

19) Kienholzの手法 (H. Kienholz, 1985)

KienholzはNepalのKatmandu北部の人口集中地区における斜面安定問題評価法(Hazardアセスメント)を確立する目的で、斜面勾配、地表の乱れ、基岩種や受け盤・流れ盤等の地質構造、排水状態の良否などの要因から、論理代数式を応用した手法で危険度を推定した。用いられている要因は上述NewZealandの方法に岩種別限界勾配(安息勾配)と植生を加えたもので、間接法の代表例のひとつである。ただし、基礎資料として用いる既往災害資料の精度や、調査を実行する人物の主観によって、論理式の論理判断が大きく変化するので、この点を客観的になるように留意する必要がある。また危険度は「大規模な地すべり発生に対し危険」、「表層崩壊に対し危険」、「発生の危険なし」の3ランク設定され、初生地すべりについては「発生のない斜面」にランク付けをして判断することになっている。

20) 春山・北村の手法 (M. Haruyama, R. Kitamura, 1984)

この手法は火山地帯、特に桜島における地すべり・崖崩れ・土石流(総称してland slides)の発生危険度を判定するため、斜面をメッシュに区分し数量化理論第Ⅲ類によりメッシュ毎の各因子にscore(点数)を付す間接法である。使用する判定因子は、標高、等高線密度、起伏量、谷密度、斜面縦・横断形状など地形と地質・植生となっている。判断されるのは土砂移動(地すべり等)発生の有無で4ランクの危険度区分がなされている。ただし、対象に土石流まで入っており因子の選択が地すべりの場合と異なっている。

21) Nguyenの手法 (T. Nguyen, 1985)

最近注目されているFuzzy理論に基づき、専門家のノウハウをあいまいな表現を含めて理論化し、危険度を判定しようとするもの。使用する因子は試験的に20)春山・北村の手法とほぼ同じものを用いている。間接法と言えるが、研究段階でもありFuzzy理論のメンバーシップ関数を形成する際に取り入れる専門家の意見(アンケート調査で調べる)が大きく危険度判定を左右する問題もあり、この点に留意すれば、専門家の知識を集積したエキスパートシステムとして優れた手法となる。

世界の既往手法をここでは述べて来たが、いずれも地すべりの危険度判定要因として斜面勾配と、地質要因(地質・地質構造)を採用しており、また、これらの重要性を強調しているものも少なくない。しかしながら、これら要因による危険箇所抽出と安定解析等による詳細調査を組み合わせているものはない。

いずれにしても、この2要因は、地すべりの危険度判定には欠かさざるべきものと判断し、極力少ない要因で判定しようとする場合は少なくともこの二要因を用いて危険度を整理して行くことが、良いと思われる。

1. 4 危険箇所及び危険度判定基準の基本的な考え方

初生地すべりの危険箇所抽出や危険度判定のプロセスは、それらが発生履歴のない斜面で生じることを考えれば、前述した間接法を用いた危険箇所抽出法でなければならない。調査対象とする斜面の数は非常に多いので、すべての斜面について、詳細な調査検討を行うことは不可能である。そのため、一定の基準(記号Scで表す)

に従って危険度判定をし、さらに危険度の高いものについては、より詳細な危険度判定を行うという、2段階の危険度評価を行って精度をあげることを考える（図1-1）。

初生地すべりは、発生履歴がない、つまり、発生の危険度の徴候が捕らえ難いので、いかに危険な斜面を抽出し、いかに危険度を知るかが大きな課題となる。ところが、初生地すべりはあらゆる斜面で生じるわけではなく、断層破碎帯や貫入岩の周辺など地質的に特徴のある斜面で、その多くが生じている(Fujita, 1980, 渡, 1986)。

従って、このような地質的特徴に着目し、危険箇所を見いだして行くことが有効な手法と思われる。断層破碎帯周辺や火山体に関する危険度調査手法に関しては、既往の手法もあり(Fujita 1980, Kawakami 1984, Haruyama 1984)、従来より危険の高い所として、検討されているが、貫入岩やキャップロックのような地質境界周辺の危険度判定手法は検討例が少ない。

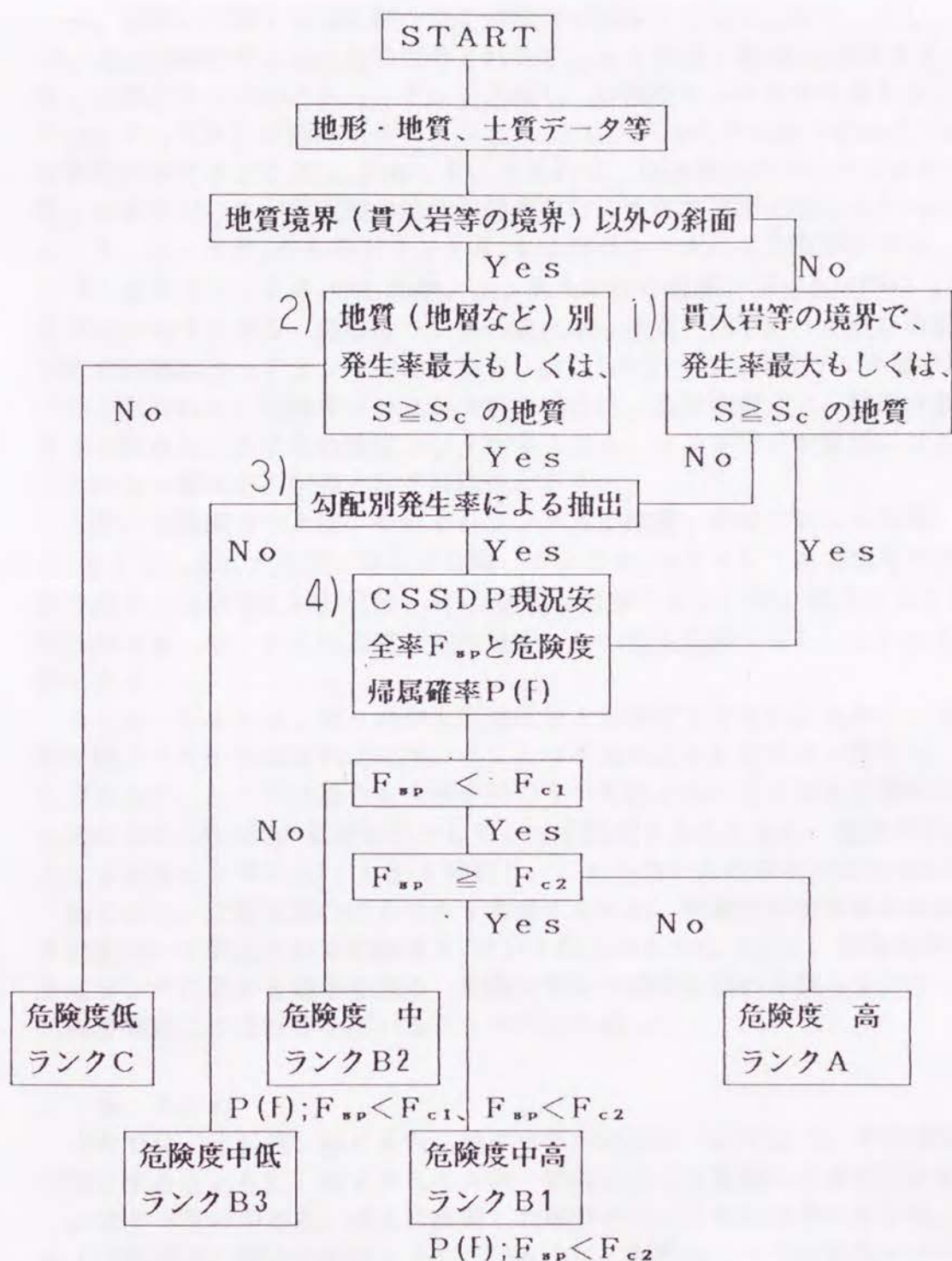
このため地すべりに関しては、上記断層破碎帯等と同様に危険と考えられる貫入岩・キャップロック周辺の斜面に対する危険度判定を検討する必要がある。従って、本研究においては、これらの貫入岩やキャップロック周辺斜面を対象とする。

ここでは、まず図1-1のように、貫入岩やキャップロック構造を持つ、あるいは、その疑いのある地質境界周辺とそれ以外の斜面とを区別し、ふるい分け（スクリーニング）を行うことから始め、これら地質境界周辺に属する斜面では、地すべりの発生率が最大のもの、もしくは、ある基準発生率 S_c より発生率の大きな地質区分（累層、岩種など）に属するものと、そうでないものを判別して二番目のスクリーニングを行う。又、地質境界周辺に属さない斜面においても、上と同様な発生率の大きな地質区分を用いて二番目のスクリーニングを行う。貫入岩等の地質境界周辺斜面は図1-1の右側のフローのように、最大発生率もしくは発生率 $S > S_c$ の地質に属する場合は、すべて、後述する臨界すべり面解析(CSSDP)による安定解析を行う。そうでない場合は、三番目のスクリーニングとして勾配別の発生率を吟味し、当該斜面が発生率の大きな勾配に属する場合にはCSSDPによる安定解析を行う。

一方、貫入岩等地質境界周辺斜面以外で一番目のスクリーニングにより、発生率の大きいと見られた地質に属するものは、上記勾配別発生率を用いた三番目のスクリーニングにかけ、選出された発生率の大きな勾配の斜面は、CSSDPによる安定解析を行う。

この地質境界周辺以外の斜面のうち二番目のスクリーニングで発生率の大きな地質に属しないものは発生の危険度が低いランクCに位置付ける。また、地質境界周辺斜面を含めて、三番目のスクリーニングによって発生率の高い勾配に属さない斜面とされたものは、危険度中低であるランクB₃に区分する。

図1-1で、CSSDPによる安定解析の対象となった斜面には、外力（誘因である 地下水圧、地震力）を与えない時の安全率、つまり現況安全率 F_{sp} が与えられると同時に、 F_{sp} を用いて決定される該当危険度ランクより上位の（より危険な）危険度ランクに帰属する確率 $P(F)$ が計算される。



ここで、 S : 発生率、 S_c : 基準発生率、 F_{c1} 、 F_{c2} : 基準安全率
 $P(F); F_{sp} < F_{ci}$ ($i=1,2$) : 基準安全率を下回る錯誤の確率。

図1-1 危険度判定フロー

今、通常の地震や豪雨に伴う発生危険度の基準となる F_{sp} を F_{c2} とし、巨大地震や、火山活動に伴う発生危険度のそれを F_{c1} とすれば、第4番目のスクリーニングは、計算された F_{sp} と F_{c1} 、 F_{c2} を比較し、危険度ランクを決めるものとする。 $F_{sp} \geq F_{c1}$ であれば危険度中のランク B_2 とし、 $F_{sp} < F_{c1}$ かつ $F_{sp} \geq F_{c2}$ ならば、危険度中高のランク B_1 、 $F_{sp} < F_{c2}$ であれば、危険度高のランク A とする。この時、計算に用いる土質定数の空間的分布のばらつきが原因で生じる F_{sp} の値の誤差により、ランク B_2 のものがランク B_1 およびランク A になる確率 $P(F)_{B1}$ および $P(F)_A$ およびランク B_1 のものが、ランク A になる確率 $P(F)_A$ も同時に与え、危険度判定の参考とする。危険度ランクの数は第一章第三節で述べた既存の危険度判定手法では概ね3～7ランクであるから、図1-1の5つの危険度ランクは平均的な区分数と思われる。危険度ランクが少数の場合は、危険度判定上、精度が悪くなると考えられるし、あまり危険度ランクが多くても、ランク分けが繁雑になる上、各ランクのもつ意味が不明確となる可能性がある。

今回の危険度ランクは、それぞれランク A が地震・豪雨に対して危険、ランク B_1 は主として、大地震に対して危険、ランク B_2 は主として巨大地震や火山活動に伴う地すべり発生に対し危険、 B_3 は通常は危険ではないが、場合により発生の危険性がある、ランク C は通常は初生地すべりの発生危険性なし、といった意味付けができる。

さらに、従来では、滑り面や土質強度などが確定できないことから、安定解析を初生地すべりの危険度判定に用いることは不適切とされてきた（例えば、渡 1986）のであるが、ここでは最小安全率を持つすべり面と最小安全率を任意の斜面形に対し求められるCSSDPの長所を生かして F_{sp} を計算するとともに、危険度判定の基準となる基準安全率 F_{ci} ($i=1, 2$) を検討し、これを用いた危険度判定を試みた。

加えるに、土質定数のばらつきを考慮するため、信頼性解析を組み合わせ、 F_{sp} を用いて判定される危険度 B_2 ランク以上のものについて、危険度がさらに大きなランクに属する確率を求め、危険度判定の精度を高める試みを行うことにより、危険度判定に安定計算を用いることの欠点を補った。

1. 5. まとめ

本章では、土石流、崖くずれ、地すべりの特徴について述べ、それぞれの定義を明確にするとともに、地すべりの人命・資産に及ぼす影響の大きいことに触れた。この地すべりの中でも、過去に移動した履歴のない「初生地すべり」は、危険箇所および危険度の判定が困難とされている上に、初生地すべりが全地すべりに占める割合は、既往地すべりの発生前空中写真の判読から見れば、40から60%に及ぶことが分かっている。この為、その危険箇所・危険度判定手法の確立が望まれているおり、本研究では、この初生地すべりを対象とした危険度判定法を検討することにした。

その第一歩として、本章では、既往の研究を概観し、その結果、初生地すべりの危険箇所・危険度を判定するためには、斜面の勾配と地質の二要因を使用して判定手法を検討するのが妥当と考えた。

さらに、研究対象を、これまでに研究がなされていない、キャップロックや貫入岩周辺の危険度判定手法に絞り、危険斜面のふるい分け（ゾーニング）を考えた。このゾーニングの手法は、4段階に分けられており、それぞれ1)貫入岩等地質境界で地すべり発生率最大の地質、あるいは、ある基準発生率 Sc を上回る発生率の斜面に属するかどうか、2)地質境界以外の斜面についても、地すべり発生率最大の地質、あるいは、ある基準発生率 Sc を上回る発生率の斜面に属するかどうか、3)地すべり発生率の大きな平均勾配に属する斜面かどうか、4)臨界すべり面解析（CSSDP）を使用して、外力を与えない時の現状安全率 F_{sp} を求め、 F_{sp} が基準安全率 F_c より大きいかどうかの可否によってふるい分けを行うことを検討した。

ゾーニングの結果は、地震・豪雨時の地すべり発生に対して危険なランクA、大地震の時に危険なランクB1、巨大地震時や火山活動など巨大な外力に対し危険なランクB2、外力等条件がそろえば地すべり発生の可能性があるランクB3、通常は発生の危険がないランクCの5ランクに区分するものとした。

また、危険度の高い斜面には、これまで導入の困難であった安定解析による定量的評価を導入する為、斜面を均質土質と仮定し、自動的に最小安全率を有するすべり面を探索できる臨界すべり面解析を用いて高速処理を行う。さらに、均質斜面の仮定や、土質定数の不確定さに起因する危険度ランクの信頼性を、さらに危険なランクに属する確率として与え、危険度ランクの信頼性評価をすることとした。

このことにより、自然斜面に安定解析を導入する際に生じる、地盤条件の不確定さによる危険度区分の信頼度の大小を評価し、初生地すべり発生の「要注意斜面」を抽出する危険度判定法として、この手法が簡便かつ精度の高い手法となるように試みた。

2. 地形・地質因子による抽出法

2. 1 概説

前出の通り地すべりや大規模崩壊の発生要因として地質条件は重要なものであり、危険箇所の判定や危険度判別には、なくてはならない要因と考えられる。

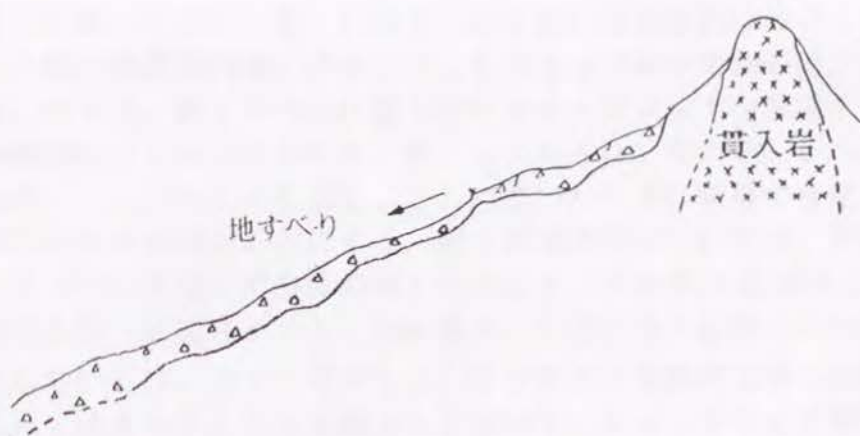
一方、地形とりわけ、勾配は土質強度・岩盤強度あるいは地質構造の発現でもあるが重力ポテンシャルの指標としても重要なものである。前章で触れたように、危険度判定において、この勾配と地質は判別要因として必ず取り扱われている重要なものとなっている。

ここでは、初生地すべりの多発するとされる（例えば 渡，1986）貫入岩等地質境界周辺においてこれらの地形・地質因子による初生地すべり危険箇所の一次的な抽出を行うため、地すべり発生頻度（発生率）とこれらの因子との関連を検討する。さらに、この検討を基に、定量的な基準発生率について述べ、より詳細な危険度判定法として、臨界すべり面解析を用いた危険箇所の抽出手法を検討する。

ここでいう地質境界部とは地すべりの発生率が高いとされる第三紀層中の貫入岩や

キャップロック境界のこととする（図2-1）。貫入岩とは、堆積岩もしくは堆積層中の弱部や亀裂に沿って火成岩が上昇し生じるもので周囲は接触熱変成作用を受けることと、地層が持ち上げられ圧砕されることから、破砕された弱部を形成する。一方キャップロックは、泥岩や頁岩等の比較的軟弱な岩盤層上に火山岩や砂礫岩層等の硬質な岩盤が存在するもので、この岩が多孔質な場合、地下水の供給が生じ、地すべりの発生を促す。この地質境界部においては地すべり発生率が極めて高く、対象地域を250mメッシュで区分して、全メッシュに対する地すべりを含むメッシュの比で、地すべり発生率を求めた研究（中村、久保田 1987）によれば、新潟県の第三紀層地帯では、その地域全体の発生率22%に対し、貫入岩の周辺斜面では43%と約2倍になっているし、長野県の第三紀層地帯火砕岩と長崎県の玄武岩のキャップロック周辺斜面では、地すべりの発生率は対象地域全体のその約1.4~1.7倍にも達している（第二章5節、6節参照）。

この検討を行なうのには、最初に単位斜面区分法を決定しなければならないが、最初に、メッシュの大きさについて検討する。既往の統計（中村、吉松、久保田ら、1985）によれば、発生した地すべりの面積は9ha（90,000m²）以下のものが大部分を占める。このことから $\sqrt{90,000\text{m}^2} = 300\text{m}$ に近く、縮尺1/25,000の地形図上にメッシュを作成するのに都合のよい長さである、一辺250mの方格メッシュによる区分法を採用する。発生率を知る為には地すべりの発生していない斜面の勾配や地質を知る必要があり、斜面を何らかの手法で単位斜面に細分化し、それぞれの単位斜面の地形地質因子を知らなければならない。その手法としてはメッシュに分ける方法の他に、一次谷や二次谷の流域を単位として流域単位にわけける方法等がある。後者は、現存する谷や峰によって発生斜面が区分される表層崩壊や、谷そのもので発生する土石流などの土砂移動現象には有効であるが、小さな谷や谷状の地形も含めた広範囲の斜面が移動する地すべりには不適当と思われる。故に、以下では勾配等の要因を知る為の斜面区分法として、既往手法でも使用されている（T. Fujita, 1980, H.



(a) 貫入岩周辺斜面の説明



(b) キャップロック周辺斜面の説明

図2-1 貫入岩およびキャップロック境界周辺の説明図

Kawakami, 1984, M. Haruyama, 1984 etc.)手法である方格メッシュによる手法を採用した。

単位メッシュで使用する地形要因としての勾配、すなわち、あるメッシュの平均勾配の定義は、斜面の上部と下部を結んだ直線の正接をメッシュ内の範囲で平均したものとなる。図2-2のように地すべり発生後のメッシュ内のある斜面の平均勾配は、地すべりの上端を形成する滑落崖の上部から移動堆積土砂の末端を含む斜面の勾配 $\tan \theta$ である。単位メッシュが地すべり地を広くカバーしているとする、メッシュの平均勾配(図2-2の df/dx)は $\tan \theta$ に近いものとなる。一方、この $\tan \theta$ は、その斜面の発生前の平均斜面勾配でもあるから、メッシュが十分に広く地すべりをカバーしていれば、得られた平均勾配はそれらが発生する以前の平均勾配と等しいものと見なして、発生前の勾配での危険度判定が可能となる。

地すべりの発生確率が高いといわれる地質境界部(貫入岩・キャップロック周辺部)に位置する斜面メッシュを示すために、図2-3のように境界部のメッシュの呼称を決定した。すなわち、地質境界の第三紀層側のメッシュに、火成岩に近い方からこ

の図のように第一レベル、第二レベル、第三レベルと名付けることにする。又、キャップブロック側（境界部内側）のメッシュをキャップブロック側の第二レベルと呼ぶことにする。つまり、第1レベルは貫入岩やキャップブロックを形成する火成岩と第三紀層の境界部のメッシュに当たり、第二レベルとは、その第一レベルと隣接する第三紀層側のメッシュのことを指し、さらに第二レベルに隣接する第三紀層側のメッシュを第三レベルと呼ぶことにする。貫入岩境界部については、堅固で地下深部より一体となっている貫入岩自体の地すべりはまれであるので、貫入岩境界部を含めてその周辺の第三紀層3メッシュ分を地すべり発生率の比較のため抽出した。キャップブロックについては、キャップブロック自体がその下部にある第三紀層の地すべりに引きづられて地すべりを生じる場合もあるので、キャップブロック側で地質境界の第一レベルに接するメッシュをキャップブロック側の第二レベルとして抽出し、第三紀層側は第二レベルまでの計3レベルのメッシュを比較検討のために抽出した。後述するように、貫入岩では第二レベルが地すべり発生率のピーク値を有し、第三レベルではその発生率はピーク値以下に低下して行くこと、そして、キャップブロックでは発生率のピーク値は第一レベルにあり、第二レベルでは第三紀層側もキャップブロック側も発生率が下がって行くことが分かっている。

このような各メッシュに属する平均勾配や地質などの因子と、そのメッシュが地すべりの発生している斜面かどうか分かれば、各因子別の発生率がカウントできる。上述の地質概念図に示されるような地質境界の周辺斜面とそれらを含む地域の各斜面を対象として危険箇所の抽出と危険度判定を行うが、図1-1に示した通りその第一段階としての地形（勾配）、地質（地層、岩種など）因子による危険箇所の抽出手法を、ここで考える。

まず、発生した地すべりの分布をもとに、直接法を用いて既往地すべりの発生率を調べ、この発生率と地形・地質因子との関連付けを検討する。本論文では第一章3節で述べたように、地すべり発生率に関する重要な要因と考えられる滑動力を支配する重力ポテンシャルの指標としての斜面勾配と抵抗力とすべり面の形成を規制する地質を取り上げて、発生率との関連を考える。

2. 2 地すべり発生率の算出法

最初に、発生率の計算法にはどのようなものが考えられるか整理しておく。

1) 斜面分割の方法

- ①メッシュ（格子）法 斜面を平面上で適当な格子に区切る手法で、メッシュが十分に小さければ、アナログ的な自然の状態をデジタル化して再現できる。
- ②単位流域又は斜面法 谷又は峰を境界として区切って考える手法で、谷や峰で区切られた斜面を超える規模の地すべり現象には不相当と思われる。

2) 計算法

- ①地すべり発生面積率 地すべりの面積と全対象斜面面積の比。 発生の頻度というよりは発生の規模を示すのに適当と思われる。

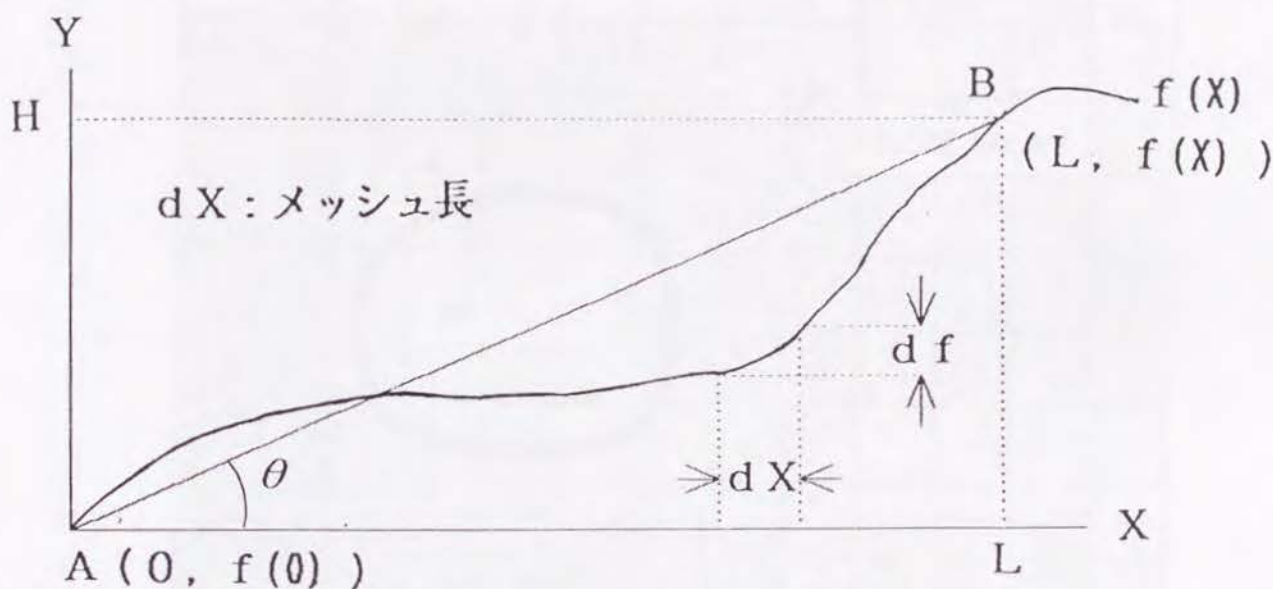


図 2-2 メッシュの平均勾配と全斜面平均勾配との関係

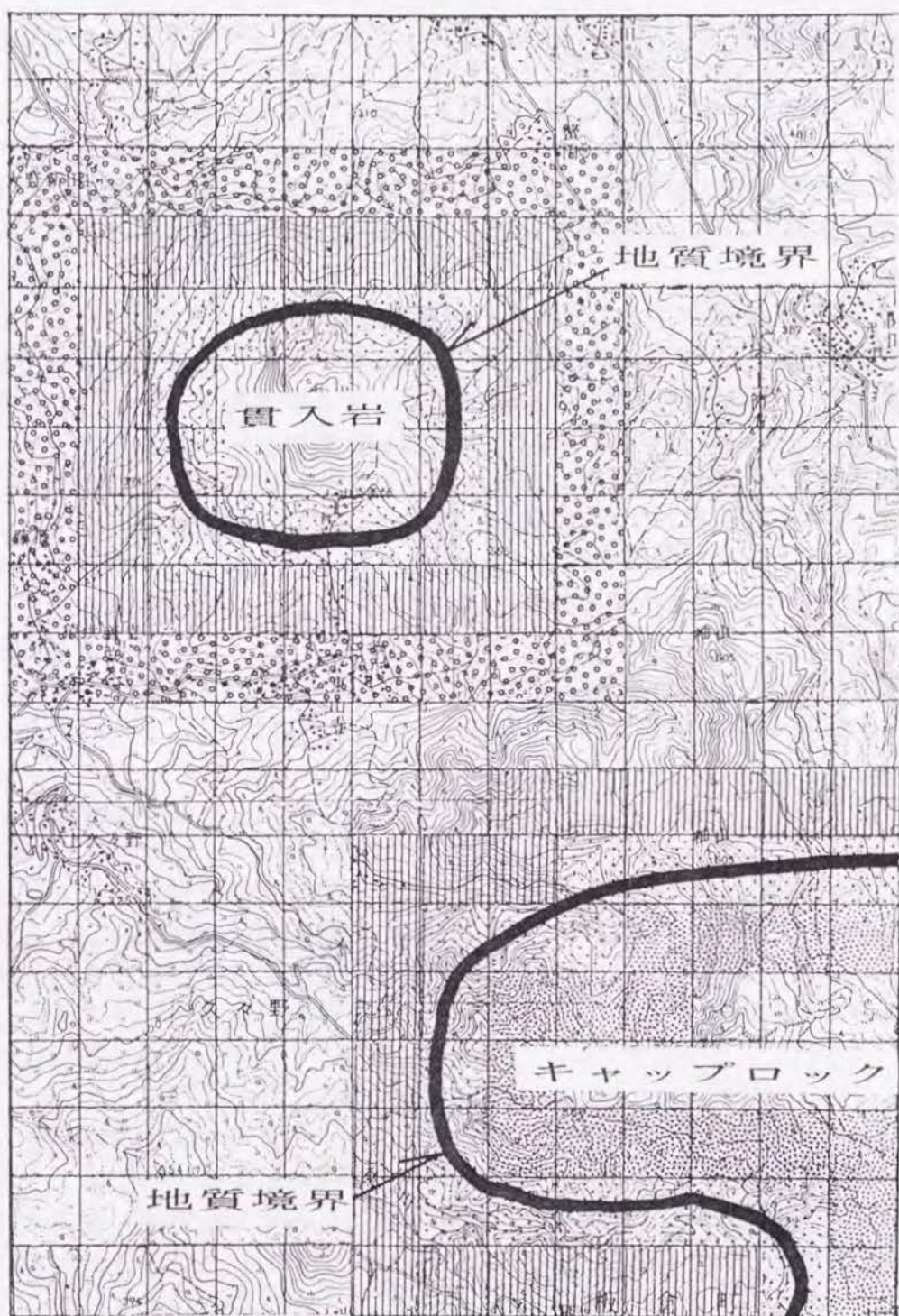
②地すべり発生斜面の個数頻度

発生の頻度を直接表現する数字である発生個数と全体の斜面個数との比。

しかし、全体の斜面個数（母集団）を求める為には何らかの斜面分割が必要となる。

上記を参考にして、ここで採るべき発生率算出法を考えれば、1) 計算手法による分類に関しては、必要とされるのが規模を示すものではなく発生数そのものの指標である発生率であるので発生斜面の個数頻度を求めるのが適当である。2) 斜面分割手法による分類に関しては、ここで取り扱う対象が発生規模の大きな地すべりであることから、第2章1節に述べたように小さな谷や谷状の地形あるいは、峰を含めた斜面が移動する可能性があり、一次谷や二次谷を単位として斜面を区分する方法よりもメッシュ法の方が適しているものと判断できる。そこでメッシュ法による発生斜面の個数頻度に関する発生率を求めることにする。

次にメッシュ法による発生率の計算法を説明する。メッシュ法で重要となるのは、そのメッシュ（格子）の大きさである。このメッシュをどのような大きさにするかにより、その中に地すべりが複数含まれる場合とそうでない場合が生じる。次で述



凡 例

- 第1レベル (地質境界部)
- 第2レベル (第三紀層側、貫入岩・キャップブロック双方の場合)
- 第3レベル (第三紀層側、貫入岩の場合のみ)
- キャップブロック側第2レベル

図2-3 貫入岩、キャップブロック周辺境界部の定義

べるメッシュの個数による発生率を考える時には、1メッシュ1個以上の地すべりが含まれるようにした方が、その地すべり該当メッシュとしての代表性が高くなる。

そこでメッシュの大きさを決める目安として既往の統計（中村、吉松、久保田、中島、1985）を用いる。この統計によると地すべりの面積は9ha以下のものが、全調査地すべり数200中190とほとんどを占めるので、ここでは $\sqrt{90,000\text{m}^2} = 300\text{m}$ に近く、使用する1/25,000縮尺の地形図上にメッシュを設定する際に便利な250mメッシュを使用することとする。

前述したように、発生率として斜面個数当たりの発生頻度を取り上げる。その時地すべり発生に關与する因子として地質と勾配を考慮する。しかし、これらの因子が、バックグラウンドとして該当するサンプル地域で発現する頻度が多ければ、地すべり発生メッシュにおける同一の地質と勾配の発現頻度も多くなってしまいうことに留意する必要がある。このため、地すべり発生頻度が真に高い地質と勾配の因子を見つけるには、サンプル地域における全斜面の各因子の頻度母集団を求めて、地すべり発生斜面におけるそれを補正する必要がある。この母集団の補正を施したものは、地すべり発生の相対頻度となるが、ここでは、この相対頻度を地すべり発生率と呼び、下式で定義する。

この式は、ある地質または、ある勾配のサンプル地域全斜面における頻度に対して、地すべり発生斜面（ここでは発生メッシュ）における同一地質または勾配の占める割合を表している。

計算は下式による。

$$S_i = P_{Li} / P_i \quad (2.1)$$

ここに、 S_i ：地質分類*i*又は、勾配クラス*i*における地すべり発生率つまり、相対頻度。 P_{Li} ：地質分類*i*又は、勾配クラス*i*の地すべり発生メッシュ数。 P_i ：地質分類*i*又は、勾配クラス*i*の全メッシュ数。

ただし、 $P_i < 5$ となる標本数の少ないクラス*i*の S_i は信頼性がないと見なし、検討よりはずした。

2.3 平均勾配の算出法

第一章1.4で述べたような調査対象地域をメッシュに分割して平均勾配を求める方法としては、Horton法がある。これは、次式により平均勾配を計算するものとなっている。

$$I = \frac{\pi}{2} \frac{D \cdot N}{\sum L} \quad (2.2)$$

ここで、 I ：メッシュ内の平均勾配（rad）、 D ：等高線の高度差。 N ：メッシュ枠と等高線の交点数。 $\sum L$ ：メッシュ枠全長。

このHorton法では、最大傾斜方向のみならずメッシュ内のあらゆる方向の勾配を平均することになる。

最大傾斜方向が土砂移動を支配する方向考えられる表層崩壊やがけ崩れと異なり、

地すべりの発生は、弱層の走行・傾斜もしくは基岩の層理や重力クリープ方向で決定されるすべり面の方向に支配される。これらの地下地質構造の発現である、見かけの基岩の堅さや安息角を相対的に代表するのは平均勾配と思われる。従って、本論文では平均勾配を、Horton法により算出して用いている。

さて、地すべり発生部（跡地）を含むメッシュの平均勾配は次の様になると考えられる。①滑落崖部を含み緩勾配部をあまり含まないメッシュでは、図2-2の $\tan \theta$ より急勾配となる。②緩勾配部を多く含むメッシュでは、同じ $\tan \theta$ より緩勾配となる。③全部分を含むメッシュでは、同上の $\tan \theta$ となり、発生前勾配と同じ平均勾配となる。

このような観点から見れば、メッシュの大きさが適当なものであれば、③のパターンで見られる平均勾配での地すべり発生頻度が得られる。すなわち、初生地すべりの危険度判定に必要な発生前の平均勾配に近い勾配と発生率の関係が得られる。

2. 4. 調査対象地

研究の対象として、この研究の目的が地質境界（第三紀層中の貫入岩、キャップロック）周辺斜面という特殊な地質構造に着目したものであることから、次で述べる調査対象地を選出した。

すなわち、地すべりの多発する泥岩地帯など第三紀層とそれを助長する地質構造である貫入岩やキャップロック周辺の地帯として著名である新潟県の長岡地区、新井地区、長野県北部第三紀層地区、長崎県佐世保北部地区を選出した。各地区の範囲は国土地理院発行の2万5千分の1地形図1枚分とした。

以下に、調査対象地の選定根拠を、地区毎に述べる。

2.4.1 新潟県長岡地区（図2-4）

この地区は長岡市とその近郊の小千谷市、山古志村を含む。地質は主として泥岩より成る魚沼層群、灰爪層、西山層、寺泊層、椎谷層と、それに接する火成岩（安山岩質）より成っているが、この火成岩は特にキャップロック構造や貫入岩形態を取らない。しかし、この地区は昭和59年に発生した蓬平地すべりに代表される地すべり多発地帯と

なっている。この火成岩周辺の発生率ならびに上記の地層別発生率を知ることにより、他地域の貫入岩・キャップロック形態地質境界との比較や地層別発生率の比較を行う。地すべりの分布は新潟県発行の1/50,000縮尺の「空中写真による地すべり地形判読図（新潟県、1982）」に依った。又、地質情報は縮尺1/200,000の「新潟県地質図（新潟県、1977）」に基づき適宜地質資料により補足した。

2.4.2 新潟県新井地区（図2-4）

当該地区は、上越市に隣接する新井市および板倉町を含む地すべり多発地帯である。地質は長岡地区と同じ県発行地質図によれば、第四系の魚沼層群等と第三系の灰爪層、西山層、椎谷層、寺泊層とその他火成岩類よりなっている。この地区には、安山岩の貫入岩周辺に分布する地すべりとして代表的な猿供養寺地すべりや、平丸地区の代表的な地すべり地などが含まれる地すべりの多発地帯である。地すべり分



図2-4 新潟県長岡地区および新井地区



図2-5 長野県北部第三紀層地区



図2-6 長崎県佐世保北部地区

布は、長岡地区と同じ新潟県発行の地すべり分布図に依った。

この地区では、特に貫入岩形態の火成岩境界周辺における地すべりに特徴があり、貫入岩周辺斜面の発生率を得る目的で選んだ。また、地層別の発生率を知り、他地区と比較する。

2.4.3 長野県北部第三紀層地区（図2-5）

この地区は、長野県北部の土尻川ならびに犀川流域の地すべり多発地帯に当たる。地質は、縮尺1/25,000の「土尻川砂防事務所管内土石流渓流地質概況図（その1）（長野県、1984）」によれば、主として第四系と第三系の砂岩、礫岩、泥岩そして火成岩類から構成されている。この中でもキャップロック形態の荒倉火砕岩類周辺や、高府泥岩層は地すべりの多いことで有名である。また、この他権田砂礫層群や千見砂岩・泥岩層、境宮砂岩・泥岩層や貫入岩類も分布している。なお、地すべり分布は、上記の県発行1/25,000分布図に依った。

この地区は貫入岩類も分布はしているものの、キャップロックとしての荒倉火砕岩類境界周辺斜面の地すべりに特徴があり、主としてこの発生率を考えるとともに、比較の為、地層別の発生率を得る目的で本地区を選んだ。

ちなみに、新潟県・長野県は全国でも突出した地すべり多発地域となっている。

2.4.4 長崎県佐世保北部地区（図2-6）

この地区は、佐世保市北郊周辺に相当し、縮尺1/25,000の「昭和56年度地すべり区域調査、地すべり分布図（長崎県、1982）」によれば、玄武岩、第三紀層、第四紀層より構成されている。また、玄武岩は当地区内ではキャップロックとして存在し、その周辺の第三紀層地区に地すべりが多発するなどの特徴をそなえている。第三紀層は主として砂岩、礫岩、集塊岩、凝灰岩、角礫凝灰岩より成っている。なお、地すべり分布は、上記の長崎県発行分布図に依った。

この地区は長野県北部第三紀層地区の火砕岩類のキャップロックと異なり、玄武岩のキャップロックが存在するので、この境界部周辺の発生率を把握し、長野県の場合と比較する目的ならびに、地すべり多発地帯の地層毎の発生率を比較検討する目的で選出した。

これら、調査対象地の縮尺1/25,000の地すべり分布の例を図2-7に示してある。この図から分かる通り本論文で対象としている地すべり多発地帯には、かなり高い密度で地すべりが分布していることが理解できる。

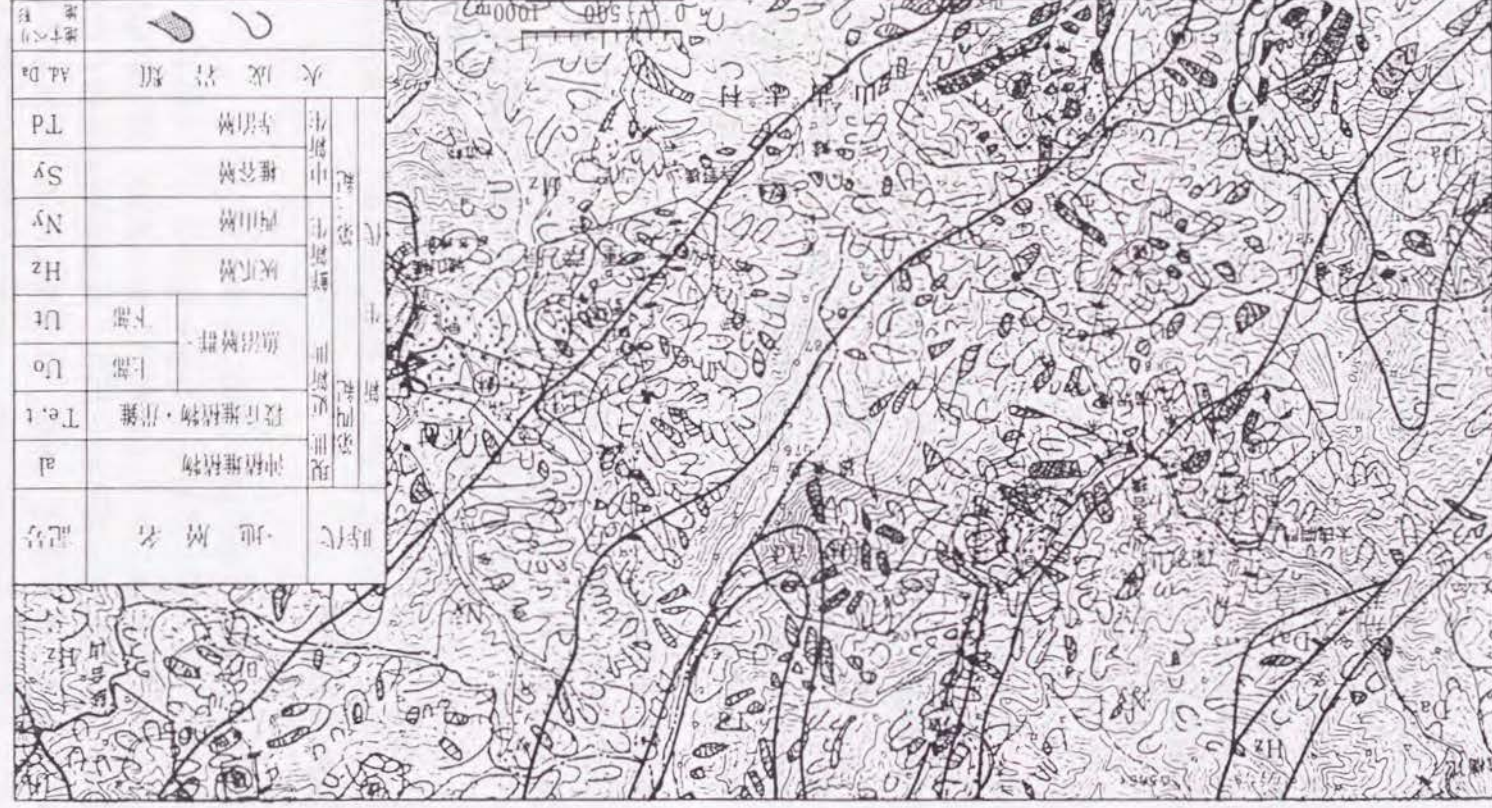


図 2 7 新潟県長岡地区地すべり分布図 (原図 1/50,000)

2. 5. 地質（地層、基盤岩種等）と発生率 S_i

最初に要因として、地質（地層、基盤岩の種類）を取り上げて、それと発生率の関係を見る。整理の方向としては、まず広範囲に第三紀層が分布する新潟県と長野県については、火成岩と堆積岩を区別し、堆積岩は累層(Formation)毎に分類する。この累層は、岩種や、鉱物組成、堆積・圧密過程の差に由来する特徴を持つ。

長崎県については玄武岩の他に第三紀層、第四紀層が分布し累層の特徴は明確ではないので、累層で分けず、大きく玄武岩、第三紀層、第四紀層と分類して発生率との関係をみることにした。これらの分類を踏まえた上で貫入岩、キャップロック地質境界周辺における発生率について検討を加える。

2. 5. 1 新潟県長岡地区

長岡地区における発生率 S_i と地質の関係は図2-8に示されている。各地層は主として泥岩・砂岩・礫岩などから成っているが、層毎に少しずつ構成岩や強度が異なっている。ただし寺泊層と椎谷層は類似の泥岩より成るので統一して扱う。

この図から分かるように寺泊・椎谷層と西山層は38%と同じ S_i を持ち、この地区では最高の発生率を持つ。次が火成岩と灰爪層の19%となる。寺泊・椎谷と西山層各層の主体は泥岩から成り、地下水により粘土化（モンモリロナイト化）して、すべり面を形成し易いので、このように地すべり発生率が高いものと考えられる。

ここでの地質境界部（第1レベルメッシュ）においては、特に地すべり発生率が高いわけではない。図2-9に、この地質境界部での勾配別の発生率を示す。

これによると S_i のピークは30%（20~25°のランク、勾配のランク等については次節で述べる。）となり、図2-8の各地質の S_i と比較しても、あるいは次節で述べる勾配別の当地区全体の S_i 最高35%（図2-15、全体）とくらべても、特別に突出した値ではない。従って、この地質境界部は発生率の増大に寄与するものではないと思われる。つまり、この地質境界では、貫入岩形態のような特殊な形態ではなく、また、キャップロックのような形態もとっていないので、地すべりは多発しないと考えられる。

2. 5. 2 新潟県新井地区

新井地区の地質要因別 S_i を図2-10に示す。この図では黒色泥岩から主としてなる寺泊・椎谷両層が $S_i=41\%$ と最高値を持ち、その他はかなり低い。これは同一の岩質である長岡地区の寺泊・椎谷層の $S_i=38\%$ よりは少し高いがほとんど一致すると言って良い。従って、新潟県下の寺泊・椎谷層は、同レベルの高い地すべり発生率を持つ可能性がある。ただし、猿供養寺地すべりに代表される貫入岩周辺の地すべり地が寺泊・椎谷層に集中していることから S_i は長岡地区より少し高くなっているものと思われる。ところで長岡地区で発生率の高かった西山層は、ここでは分布面積が少なく同系の地質の灰爪層と統合して統計を取ったが、 $S_i=13\%$ と低い発生率に止まっている。これは、地質構造が長岡地区と異なるためなのかどうか定かではない。

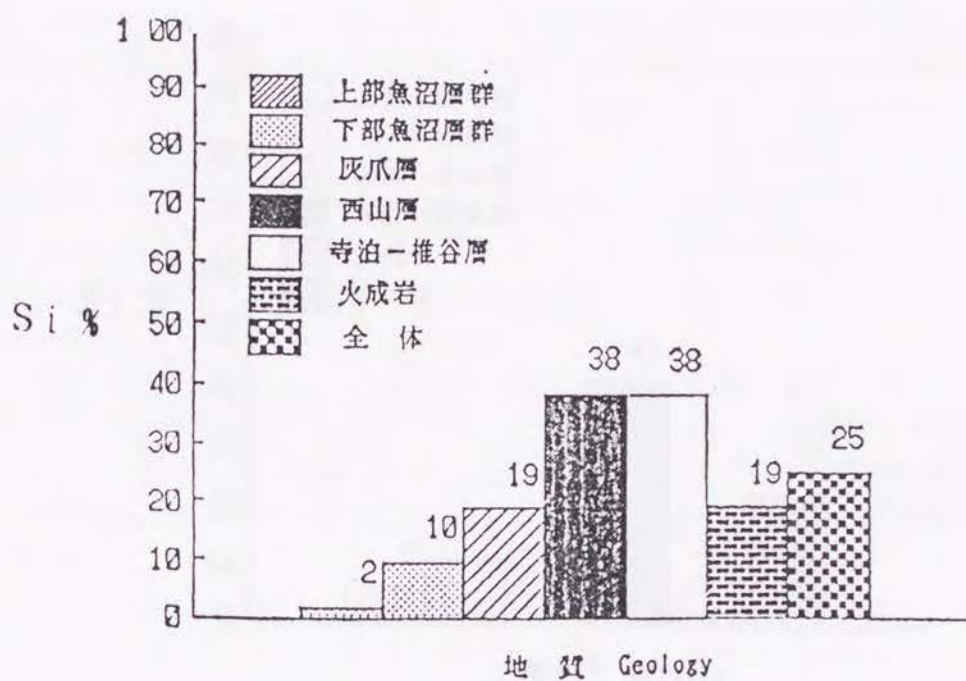


図 2-8 長岡地区 S_i と地質の関係

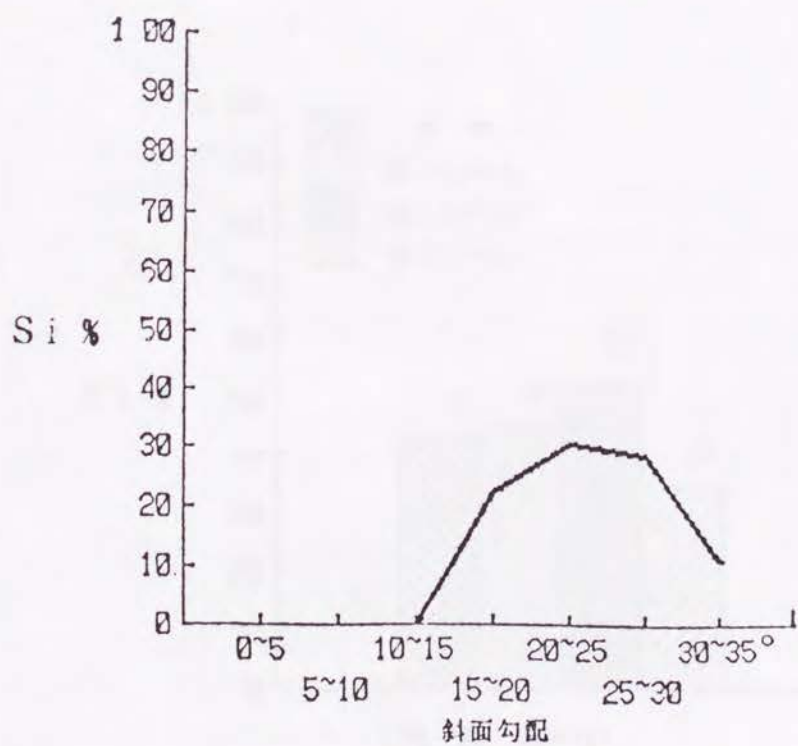


図 2-9 長岡地区火成岩境界部の S_i と勾配

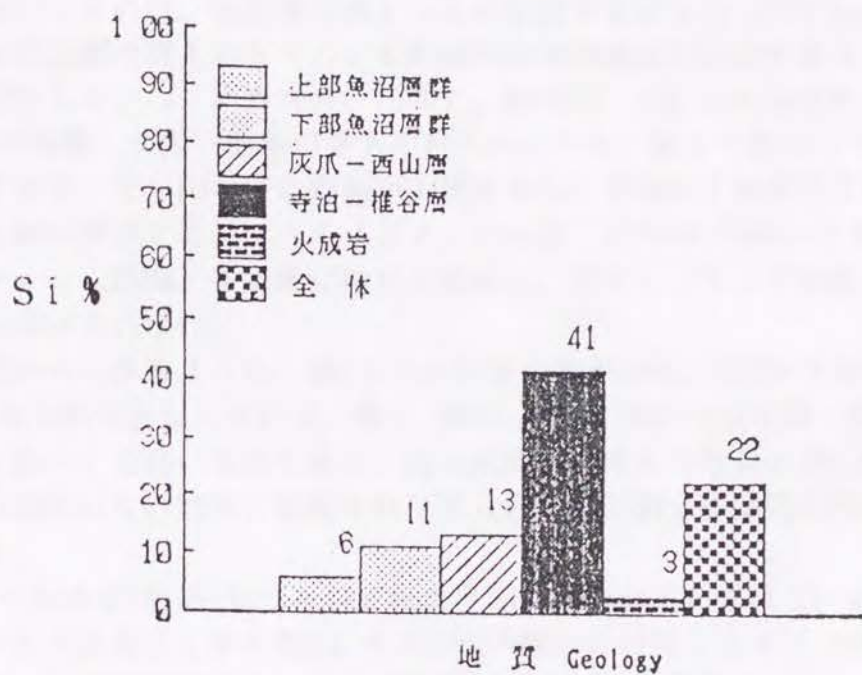


図 2-10 新井地区 S_i と地質の関係

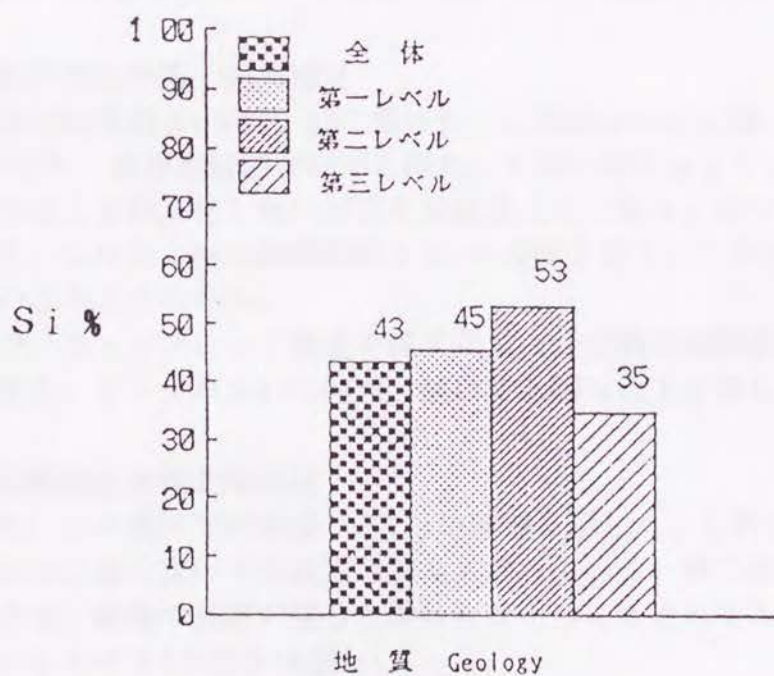


図 2-11 新井地区貫入岩周辺のメッシュ別 S_i

次に新井地区でも最大の特徴と言える貫入岩周辺斜面に着目して同様な検討を加えた。着目するのは、猿供養寺地すべりの位置する丈ヶ山(571.6m)を形成しているひん岩岩脈の貫入岩ドームとその周囲の寺泊層泥岩斜面であり、数多くの地すべりが発生している(高野秀夫、1965)。結果は、図2-11に示されている。ここでは図2-3で定義した第三紀層の貫入岩付近のレベル(第1～第3レベル)別の S_i の比較ができる。丈ヶ山の主な斜面が山頂を中心に半径約1km周辺であることから、この約1kmに該当する三レベル(3メッシュ分:3×250m 750m)と貫入岩メッシュ(約1メッシュ250m)を対象に検討を進めた。ただし、サンプル数が少ないので勾配別には分けていない。

この図から分かるように、第1レベルの発生率が45%、第2レベルのそれが53%、第3レベルで35%となっている。第1、第2レベルは図2-10の寺泊・椎谷層のピーク値41%に比べても高いものであり、貫入岩周辺の地すべり発生率の高さが分かる。図2-10の全体の $S_i=22\%$ と比較すれば貫入岩周辺斜面全体は発生率の高いものと判別される。

第2レベルの S_i が第1レベルのそれより高い理由は定かではないが、丈ヶ山が貫入岩ドームであることから第2レベルの地下部からの押し上げ圧力変成が第1レベルより強かった可能性がある。さらに比較の意味で、本地区においても、貫入岩構造を取らない火成岩の地質境界において、境界部である第1レベルを対象として、その発生率を調べたが、 S_i の勾配別最大値は20%と低く、次節で述べる当地区の勾配別 S_i の最大値38%(図2-16)や図2-10の全体値 $S_i=22\%$ と比較しても、地すべり発生の素因となるような地質境界ではないと考えられる。つまり、貫入岩形態をとることが、この地域では地すべり発生に重要であると思われる。

2.5.3 長野県北部第三紀層地区

この地区の地質別 S_i を図2-12に掲げた。この図からは、境ノ宮千現砂岩・泥岩層が $S_i=73\%$ 、高府泥岩層が65%と際だって高い値を示している。

これは両者とも粘土化し易い泥岩を構成岩としており、すべり面が形成され易い為であろう。しかし、権田砂礫層群も $S_i=40\%$ と高く、これは破砕帯によって破砕されている為と思われる。

ところで、キャップロック構造を成す荒倉火砕岩類周辺斜面の発生率は、勾配別に整理すると、ピークが $S_i=100\%$ 、最小でも80%以上と著しく高いものとなる。

2.5.4 長崎県佐世保北部地区

図2-13に、この地区での地質と S_i との関連を示した。これによると、第三紀層が $S_i=50\%$ と高く次いで玄武岩の39%となっている。第三紀層は累層としての特徴が薄いので、新潟や長野の場合と異なりひとつにまとめてあるが、第四紀層との比較においてその S_i の高さは著しい。

第三紀層や玄武岩の S_i が高い原因の一つには、玄武岩が多孔質なものとなって雨水を地下水として貯留し、斜面下層の強度の弱い第三紀層へ供給するため、豪雨などの際、この弱い層の斜面における間隙水圧が上昇し、地すべりが生じ易いこと

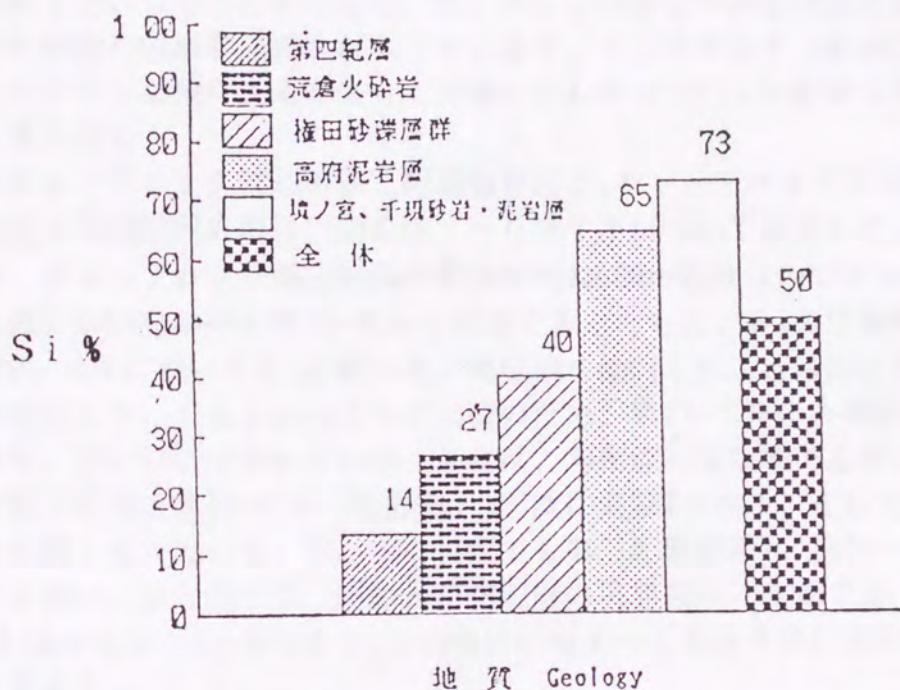


図 2-12 長野県北部地区 S_i と地質の関係

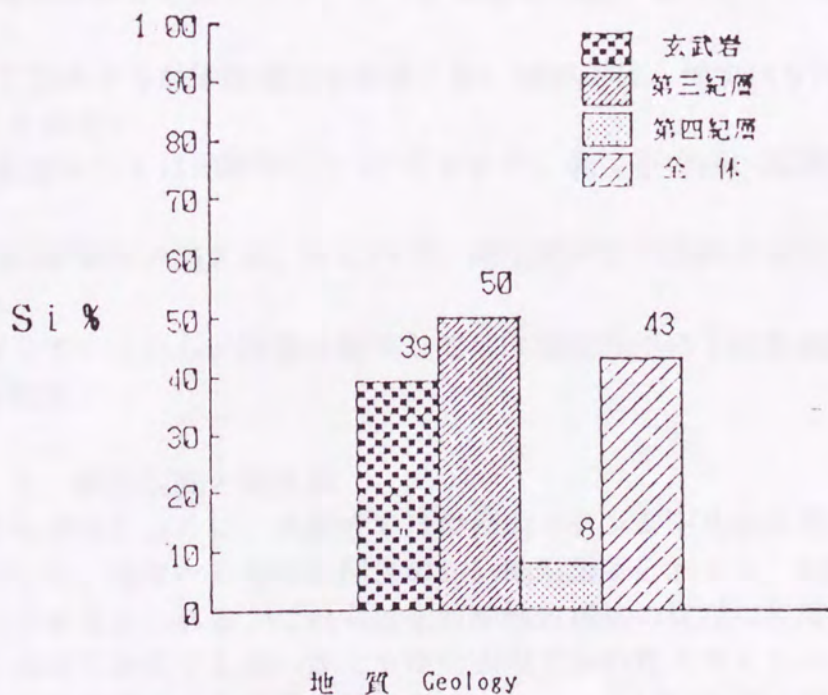


図 2-13 長崎県佐世保北部地区 S_i と地質の関係

が考えられる。つまり、未固結でかつ粘土化し易い泥岩などを含む第三紀層が上部からの地下水供給を受け、重力クリープ面等粘土化した弱部に間隙水圧が働いて滑動し始めるといったことが生じる。又、キャップロックの玄武岩自体も下方の第三紀層やその他の弱層が侵食されることにより、トップリング（転倒）的な崩壊やオーバー・ハングした後に支えを失って崩壊してしまうといった形態で地すべりを生じ易いと思われる。

次にキャップロック周辺の第三紀層境界部と、キャップロックとは接していない第三紀層と第四紀層の境界周辺の地すべり発生率について検討した。第三紀層については、キャップロック周辺斜面の範囲が概ね500m程度なのでメッシュ2つ分すなわち図2-3の第1レベル第2レベルを採用するとともに、 S_i の比較的大きい玄武岩側の第2レベルについても、比較の為、発生率を検討した。さらに、第三紀層・第四紀層の境界についても上述のように比較のため、第1レベルのみ検討を試みた。

結果は、図2-14に示されている。これは、勾配別に示してあるが、最も S_i の高いのは第三紀層の第1レベル（境界部）で、次に同第2レベル、そして玄武岩側の第2レベルの順となっている。又、どの勾配でも第三紀層の第1、第2レベルは S_i が60%以上と高い。また逆に第三紀層と第四紀層の境界部は、次節で述べる勾配別の S_i 分布と比べても、 S_i が小さく、この地区の地すべり発生を特に規制する境界ではないと言える。

故に、この地区では、やはりキャップロックを形成する玄武岩との境界が地すべり発生の重要な特徴となっている事が分かる。

以上、この節では、地質と発生率 S_i の関係について述べた。結果を整理すると、次の様になる。

- 1) 貫入岩あるいはキャップロック構造を形成する境界部に地すべりは多発する。
- 2) 上記のような地質構造を形成しない境界部は、地すべりの発生を促進させることはない。
- 3) 累層もしくは地層毎に S_i に差があり、発生率の高い累層等が抽出可能である。
- 4) S_i が50%を越える、すなわち、発生率が全斜面の半分以上となるものが存在する。

従って、これらの特徴を勘案して危険箇所抽出の手法を構築して行くことが考えられる。

2. 6. 斜面勾配と発生率

前にも述べたように、本研究では滑動力ポテンシャルの重要な指標としての勾配に着目した。地すべり発生に関係の深い地形因子としては、勾配の他に谷密度や起伏量などが考えられる。これらは土質や地質構造の発現の程度を表現したり、流水や地下水などが集中し易いかどうかを表現する指標と考えられる。しかし、本研究は特殊な地質構造である貫入岩やキャップロック周辺斜面に着目しており、誘因と

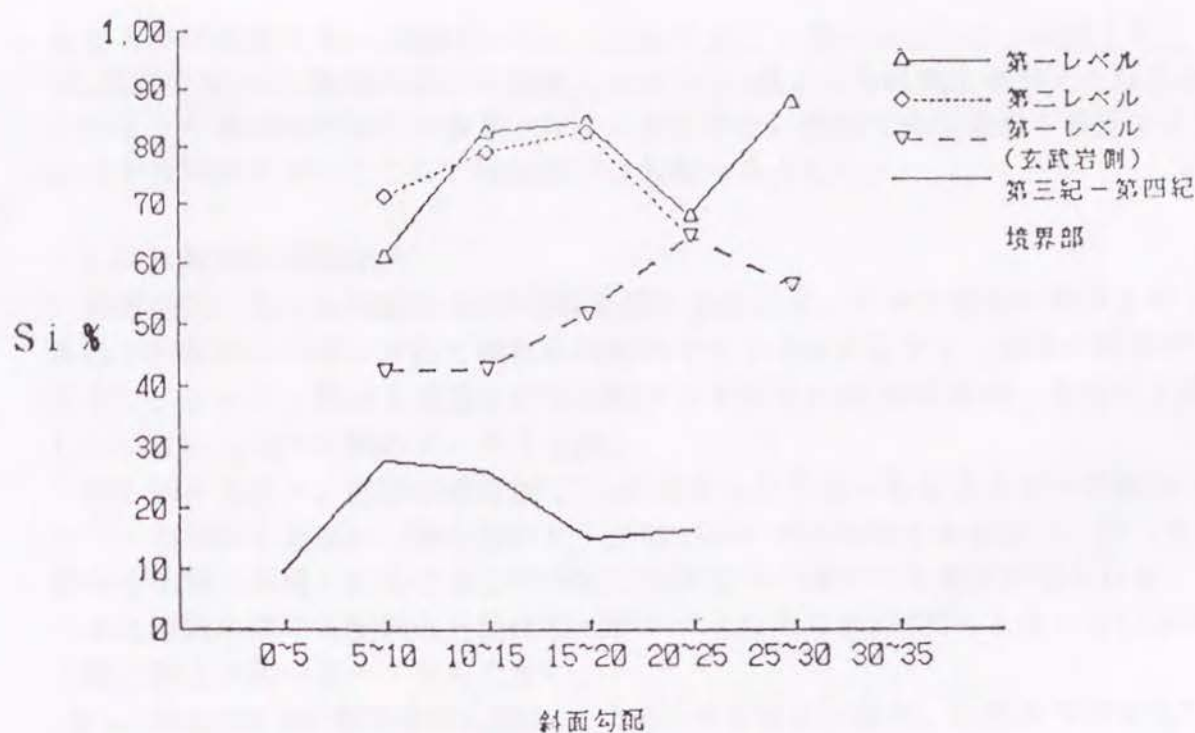


図2-14 長崎県佐世保北部地区キャップロック周辺，第三紀-第四紀層境界部の S_i と勾配

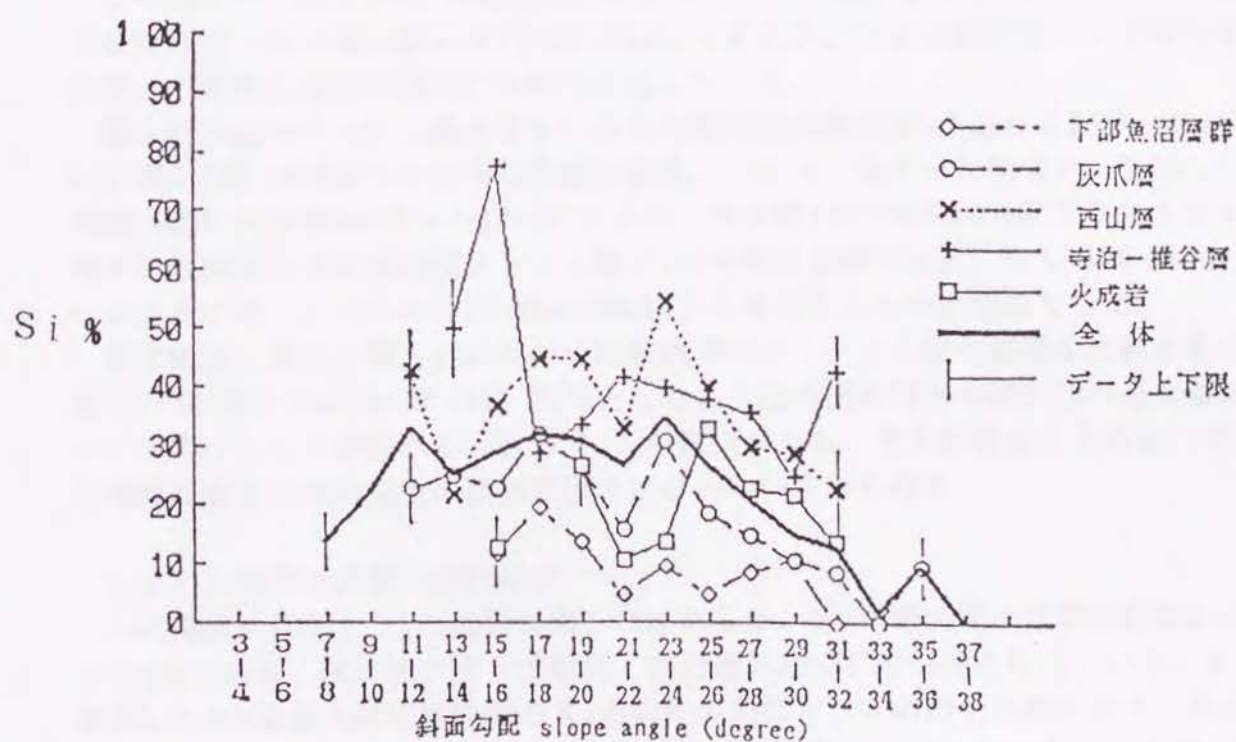


図2-15長岡地区 S_i と勾配，地質の関係

しても特に豪雨あるいは融雪などによる地下水圧上昇のみならず、地震も考えている。地震の場合は、峰部において地震力が集中し、地すべりの発生率が大となるから、このような集水地形を特に取り上げず、極力少ない要因で危険箇所を特定できるかどうかを検討することとし、地形因子は勾配のみとした。

2.6.1 新潟県長岡地区

長岡地区における勾配と S_i の関係を図2-15に示す。データ整理の都合上サンプル数が勾配毎にバランス良く取れる勾配のクラス分けとして 2° 刻みを採用するとともに、メッシュ数が5未満となる勾配クラスの S_i は信頼性が薄いと考慮して採用していない(図中凡例のデータ上下限)。

図2-15を見ると、前節の地質別で S_i の高かった寺泊・椎谷層のピーク値 $15\sim16^\circ$ クラスの78%を最高に、西山層のピーク値 $23\sim24^\circ$ の55%などが目立つ。従って、これらの地質(累層)におけるこの勾配ではかなりの地すべり発生が見られる。

また地区全体の勾配別最大値は $23\sim24^\circ$ クラスにあり $S_i=35\%$ となっているが、上記二層ほど鋭いピークをもたない。

更に、前出図2-9の地質境界に関してはデータが少ないので、勾配クラスが 5° 刻みとなっており、図2-15とは勾配の刻みが異なるが、最高値の S_i が30%程度と、この全体の傾向と比較しても全勾配にわたり、特別発生率の高いものとは言えない。

2.6.2 新潟県新井地区

この地区の勾配と S_i の関係は図2-16に示されている。最も S_i の大きいものは、やはり寺泊・椎谷層の最大値 $13\sim14^\circ$ の50%であるが、あまり鋭いピークを持たない。次が、下部魚沼層群の $17\sim18^\circ$ の40%となっている。

貫入岩周辺のメッシュ数は少ないので勾配別相対頻度 S_i を取れる程データがない。図2-17には地すべりを含む斜面の個数、つまり、地すべり頻度 P_{Li} を示した。頻度が多いのは第3レベルの $10\sim15^\circ$ クラス、次が第2レベルの $10\sim15^\circ$ クラスとなるが、地すべり斜面を含む全斜面メッシュ数 P_i の分布と比較すると、むしろ $20\sim25^\circ$ の第一レベル、第二レベルの S_i が概ね70%以上と高くなるものと想像できる。

新井地区における貫入岩以外の火成岩境界のデータと上記の結果を比較すると、前者の S_i 最大値は $15\sim20^\circ$ の約20%となり、上記の概ね70%や図2-16の最大値に比べて相当小さいことが分かる。従って、この観点からも、貫入岩構造をとらない火成岩境界は地すべりの発生の規制要因とはならないと思われる。

2.6.3 長野県北部第三紀層地区

この地区の勾配と S_i の関係は図2-18にあるが、 S_i の最高値は高府泥岩層 $9\sim10^\circ$ の100%である。次は境ノ宮千現砂岩・泥岩層の $33\sim34^\circ$ の94%となっている。また、前出2.5.3の荒倉火砕岩境界部の S_i と勾配の関係と、この図を比較すると、前者の S_i の方が高く、キャップロック構造を持つ火砕岩周辺の発生率が高いことが、再度確認できたと思われる。

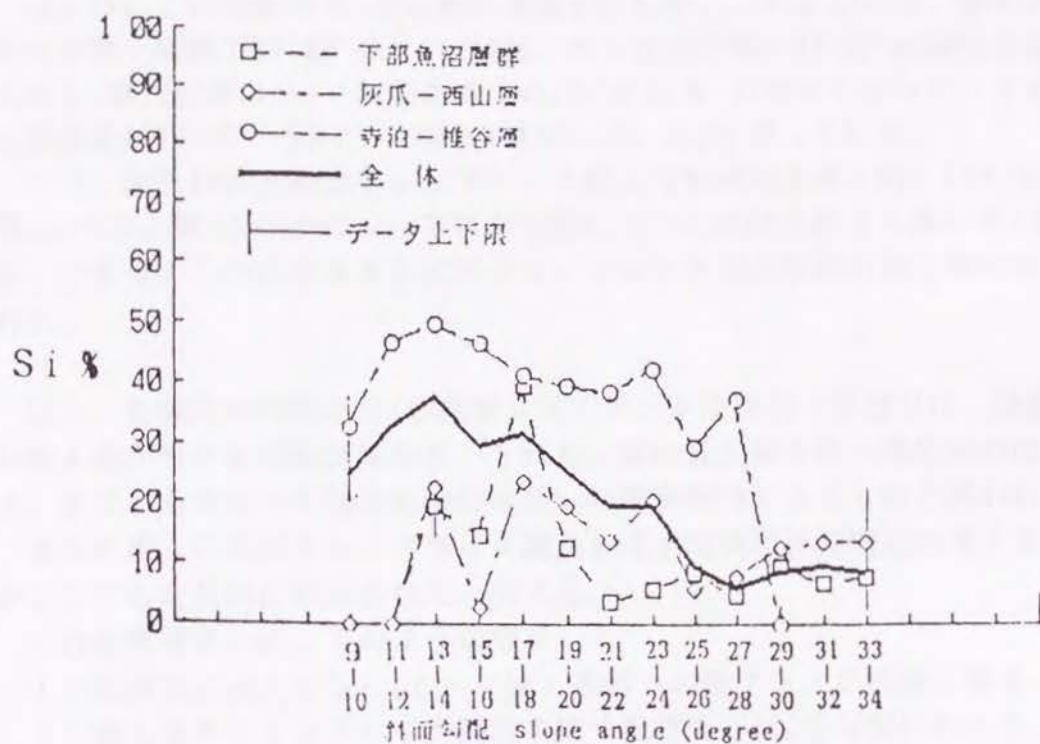


図2-16 新井地区 S_i と勾配, 地質の関係

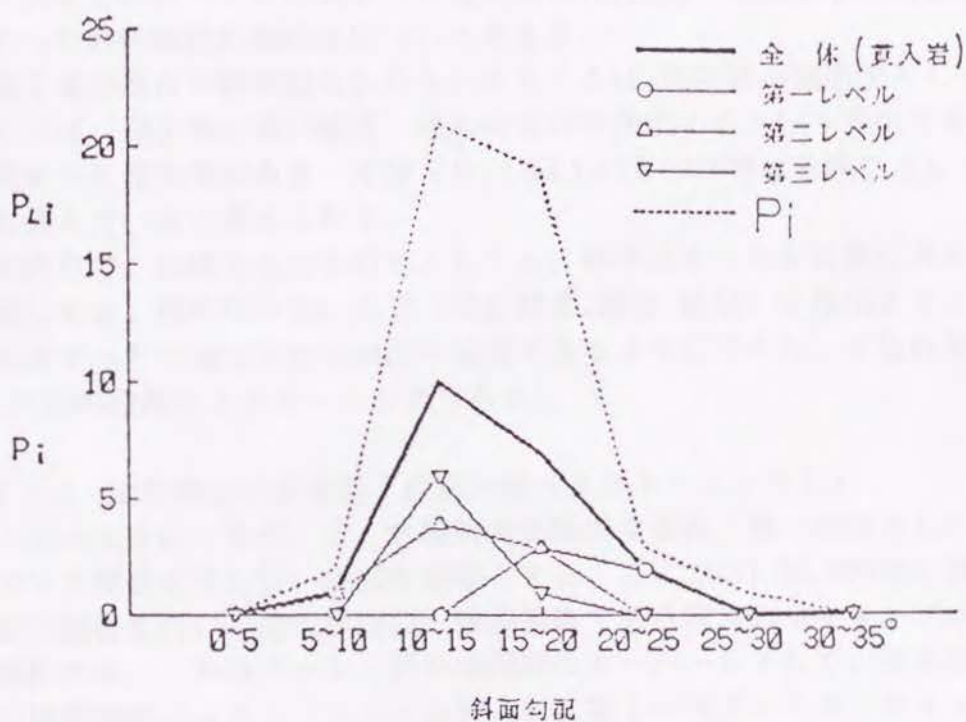


図 2-17 新井地区貫入岩周辺の勾配別地すべり頻度

2.6.4 長崎県佐世保北部地区

図2-19にこの地区の S_i と勾配の関係を示した。これによれば、最も高い値を示すのが第三紀層で $27\sim 28^\circ$ の $S_i=74\%$ 、次が玄武岩層の $21\sim 22^\circ$ の 60% となっている。ただし、第三紀層は S_i -勾配曲線中の $17\sim 18^\circ$ にも 67% の小さなピークをもつ他、玄武岩層は $19\sim 20^\circ\sim 27\sim 28^\circ$ では $56\sim 60\%$ の高い S_i を保っている。

一方、図2-14の玄武岩キャップブロック周辺勾配別発生率と図2-19を比較すると、第1レベル、第2レベルについては全勾配に亘って地区全体より高い S_i を示している。つまり、この点からも玄武岩キャップブロック周辺斜面の発生率の高さが確認された。

以上、各地区の勾配と S_i の関係を見て来たが地質別（累層又は、地層別）に S_i の最大値が現れる勾配が異なり、それも、概ね最大値を持つ発生率の高い勾配クラス、すなわち地すべり発生危険度の高い勾配が判別できるものと思われる。

さらに貫入岩及びキャップブロック構造を成す地質境界部周辺の発生率が高いことがここでも定量的に検証されたと言える。

これを整理すれば、下のようになる。

- 1) 地質別に最大の S_i （ピーク値）を持つ勾配クラスが判別し得る。
- 2) 貫入岩やキャップブロック構造を持つ境界周辺は、全勾配にわたり、発生率がそれ以外の斜面よりも高くなる。

2.7. 地形・地質因子による抽出法

これまでに述べてきた地すべり発生率 S_i と地形・地質因子の関係を基に、初生地すべりの危険箇所抽出法について考える。

第1章の既存の研究結果からいえることは、危険箇所抽出法として、まず考えられるのは、発生率の高い地質・地形のものを抽出するという方法である。この場合に地すべり発生率がある一定値（ S_c ）以上のものは特に危険だとして抽出する手法も含まれていると考えられる。

本研究で、同様な方法を取るとしても、初生地すべりを対象に考えていることを念願におき、発生率の高い地質（地質構造、累層、地層）を抽出することから始めて、初生地すべりの発生可能な斜面を抽出できるように考えた。すなわち図1-1における1)~3)の段階のスクリーニングである。

2.7.1. 地質構造による第1段階抽出（スクリーニング1）

上記のように、まず、広く危険箇所を抽出する為、第一段階として貫入岩やキャップブロック構造を含む広い範囲を対象とする。ここでは1/25,000地形図1枚範囲で発生率の調査を行い、発生率の高い地質構造である貫入岩やキャップブロック周辺斜面を抽出する。これはメッシュ図を地質図にオーバーレイして、貫入岩やキャップブロックの境界斜面メッシュ（ここでは貫入岩は第1～第3レベル、キャップブロックは第1、第2レベルの各メッシュとなっている。）を抽出することにより行われている。

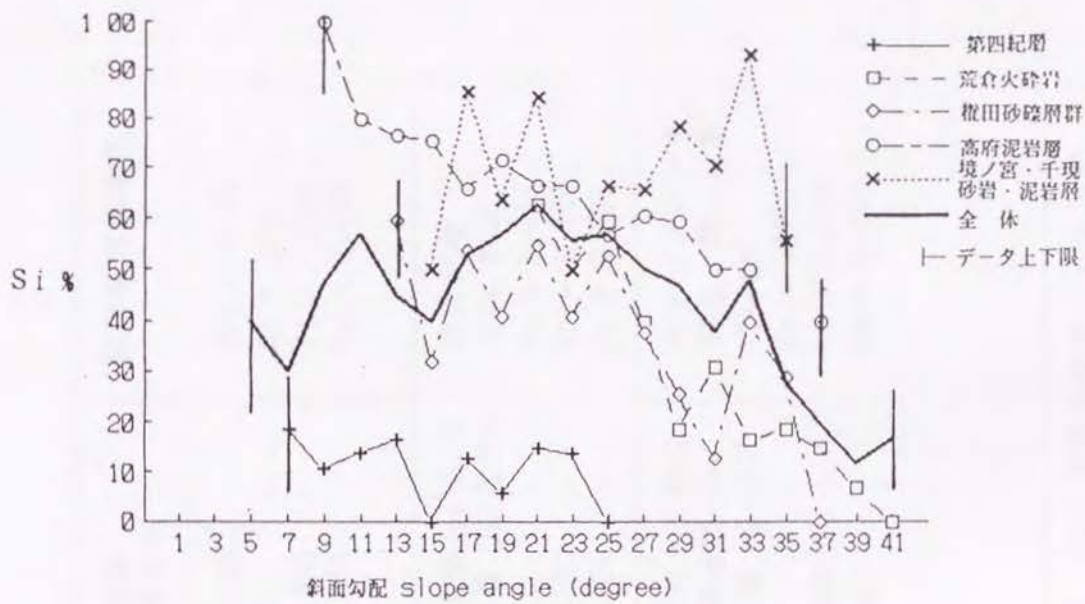


図 2-18 長野県北部地区 S_i と勾配, 地質の関係

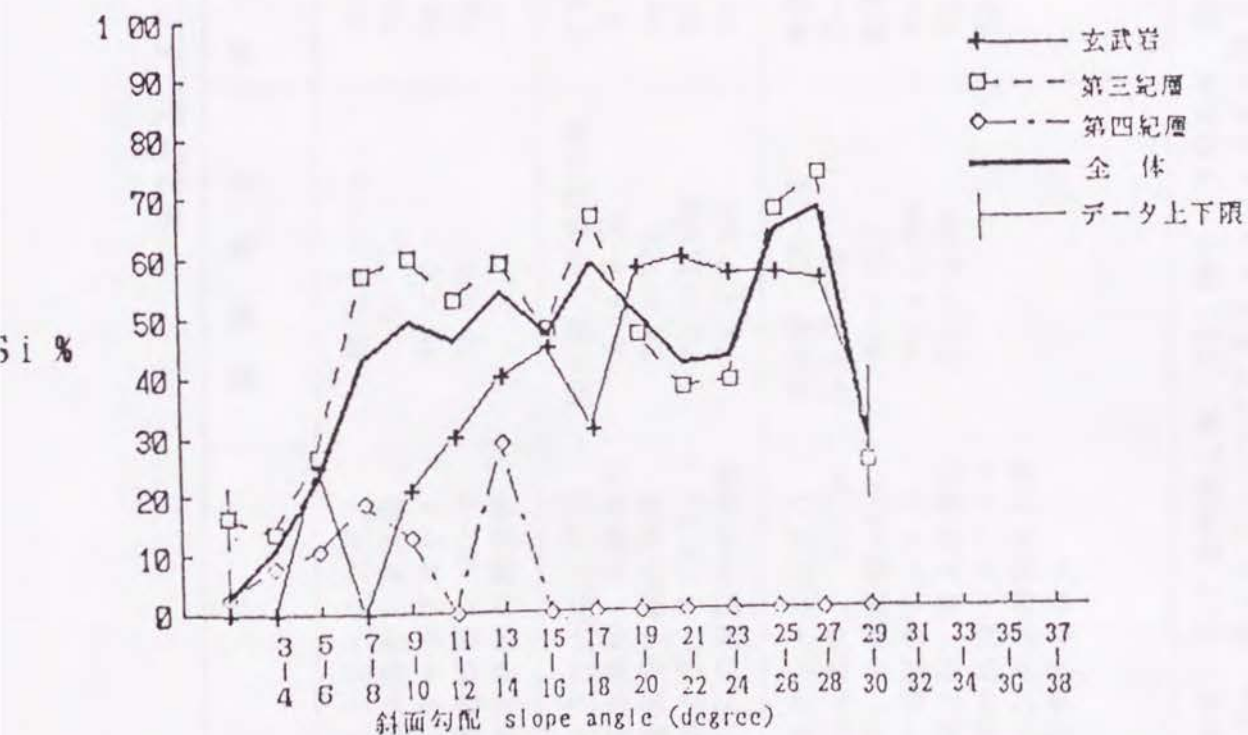


図 2-19 長崎県佐世保北部地区 S_i と勾配—地質の関係

表2-1 スクリーニング1～3総括表

	長岡地区	新井地区	長野県北部 第三紀層地区	佐世保北部地区
スクリーニング1 抽出条件：貫入岩 ・キャップロック 周辺斜面で $Sc =$ 地区全体の発生率	抽出メッシュ なし $Mn = 0$ $Rp = 0$	$Sc = 0.22$ $Mn = 64$ $Mt = 1,665$ $Rp = 0.038$	$Sc = 0.50$ $Mn = 63$ $Mt = 1,593$ $Rp = 0.040$	$Sc = 0.43$ $Mn = 148$ $Mt = 1,526$ $Rp = 0.097$
スクリーニング2 抽出条件：当該地区 最高発生率の地質、 および、 $Si \geq Sc =$ 0.5 の発生率の地質	西山層、寺泊椎谷層 $Si = 0.38$ $Mn = 724$ $Mt = 1,665$ $Rp = 0.435$	寺泊椎谷層 $Si = 0.41$ $Mn = 667$ $Mt = 1,665$ $Rp = 0.401$	境ノ宮千現層 $Si = 0.73$ 高府泥岩層 $Si \geq 0.5$ $Mn = 829$ $Mt = 1,593$ $Rp = 0.520$	第三紀層 $Si = 0.50$ $Mn = 1,055$ $Mt = 1,526$ $Rp = 0.691$
スクリーニング3 抽出条件：勾配別 Si の最高値*を示 す勾配のメッシュ、 および、貫入岩周辺 等の斜面でスクリー ニング2の要件を満 たすメッシュ	西山層 23～24° 寺泊椎谷層 15～16° $Mn = 112$ $Mt = 1,665$ $Rp = 0.067$	寺泊椎谷層 13～14°、 貫入岩周辺 $Mn = 122$ $Mt = 1,665$ $Rp = 0.073$	キャップロック周辺 境ノ宮千現層 33～34° 高府泥岩層 9～10° $Mn = 84$ $Mt = 1,593$ $Rp = 0.053$	キャップロック 周辺、第三紀層 27～28° $Mn = 167$ $Mt = 1,526$ $Rp = 0.109$

脚注) Sc : 基準発生率、 Si : 地すべり発生率、 Mn : 抽出されたメッシュ数、 Mt : 地区全体のメッシュ数、
 Rp : 各スクリーニングによるメッシュの抽出率 ($Mn \div Mt$)。 * 5メッシュ以上のデータのものより判断。

当該地区全体の発生率 (S_c) と比較して高い発生率 S_i を持つメッシュを危険メッシュとして選ぶ。この第一段階抽出 (スクリーニング1) は、図1-1の「1) 貫入岩等の境界で、発生率最大もしくは、 $S_i \geq S_c$ の地質」による抽出に当たる。

これを前出各地区に適用すれば、次の様となる (表2-1スクリーニング1の欄)。

- 1) 長岡地区 貫入岩、キャップロック形態の地質構造がなく該当なし。
- 2) 新井地区 地区全体の $S_i = 22\%$ なので、図2-11より、第3レベルまで抽出され貫入岩周辺斜面の抽出メッシュ数 (M_n) は64となり、当地区メッシュ総数 (M_t) は1,665であり、抽出率 (R_p) は約3.8%となる。
- 3) 長野県北部第三紀層地区
図2-12よりこの地区全体の $S_i = 50\%$ であり、キャップロック形態をとる火砕岩周辺斜面では $S_i \geq 80\%$ なので、これと比べると、周辺斜面は全メッシュ抽出されて、キャップロックである荒倉火砕岩周辺斜面の抽出メッシュは、 M_n 63である。一方、この地区のメッシュ数は M_t 1,593で、このスクリーニング1で全体の約4.0%が抽出された。
- 4) 佐世保北部地区
図2-13よりこの地区全体の S_i は43%であり、一方キャップロック周辺は図2-14より $S_i \geq 60\%$ であるので、第1、第2レベルともにこの段階で抽出される。このキャップロックの玄武岩周辺斜面メッシュが M_n 148であるのに対し地区のメッシュ数 M_t 1,526で、スクリーニング1では R_p 約9.7%が抽出されたことになる。

以上のように、貫入岩・キャップロックという地質構造に着目すれば、各地区とも全メッシュのうち数パーセントが抽出される。ただし、長岡地区のようにこの抽出に対し該当がないものもある。

2.7.2 地質による第二段階の抽出 (スクリーニング2)

第二段階としては、地質 (累層・地層) による抽出を行う。抽出法としては次の二つに当たるものを抽出する。これは、図1-1の「2) 地質別発生率最大もしくは、 $S \geq S_c$ の地質」による抽出に該当する。

- ①該当地区の中で最も発生率 S_i が高い地質のもの。
- ②斜面の半分以上が地すべり発生の危険性を持つことになり、極めて危険と思われる斜面。つまり $S_c = 50\%$ と考え、 $S_i \geq 50\%$ の地質を持つもの、言い換えれば、初生地すべりが発生する可能性と、発生しない可能性が5分5分となるから、危険性を十分に吟味せねばならないと思われるもの。

上記を各地区に適用すると (図1-1の中の地質別発生率による抽出)、次の様になる (表2-1のスクリーニング2の欄)。

1) 長岡地区

図2-8より西山層と寺泊・椎谷層は同率の38%となり、地区最大となっている。従って、両者を抽出すると西山層は385メッシュあり、寺泊・椎谷層は339メッシュあるので長岡地区全体の1,665メッシュに比べると、西山層では23.1%、寺泊・椎谷

層では20.4%、それぞれ、全地区より抽出されたことになる。この二層の抽出メッシュの合計は、Mn 724で、結局この二層の抽出率Rpは43.5%となる。

2) 新井地区

図2-10より寺泊・椎谷層のSiが41%で、この地区最大となっているので、これを抽出する。新井地区全体のメッシュ数1,665に対し寺泊・椎谷層のメッシュ数667を比較すれば、全体の約40.1%が抽出されることとなる。

3) 長野県北部第三紀層地区

この地区では、図2-12より境ノ宮千現砂岩・泥岩層がSiは73%で最高値を示すので、これをスクリーニング2として抽出する。

全地区のメッシュ数1,593に対し、この地層に属するメッシュ数は592で、約37.2%が抽出される。しかし、前出のようにSi \geq 50%である高府泥岩層も、図2-12より抽出されるのでこのメッシュ数237を境ノ宮千現砂岩・泥岩層に加えるとメッシュ数829となり地区全体の約52.0%が抽出されることになる。

4) 佐世保北部地区

当地区のSi最高値は図2-13より第三紀層の50%となり、このメッシュは1,055ある。従って地区の全メッシュ数1,526と比べれば、約69.1%が抽出される。

このように、地質（累層・地層）に基づく抽出では、各地区とも数十%以上と、かなり広範囲に抽出される結果、初生地すべりの危険箇所もかなり含まれることになる。

しかし、ここまでのスクリーニング1と2では抽出される斜面が多すぎるから、次のスクリーニング3により詳細調査対象地を選んでゆく。

2.7.3 勾配による第三段階の抽出（スクリーニング3）

ここでは勾配別発生率（Si）による抽出を考える。つまり、同一地質の中でも、Siの最高値を示す勾配の斜面（メッシュ）を抽出し、より精密な調査に供することとする。ただし、Siを計算する際の信頼性を考え、最低5メッシュ以上ある勾配ランクのみ使用する。

このスクリーニング3を各地区に適用すると次のようになる（表2-1のスクリーニング3の欄）。

1) 長岡地区

スクリーニング2で抽出された西山層と寺泊・椎谷層のうち、前者は図2-15から23~24°クラス、後者は15~16°にピークを持つ。西山層23~24°のメッシュ数は55であり、当地区の西山層メッシュ数は385であるから西山層に対し約14.3%、地区全体では1,665メッシュあるのでそれに対しては3.3%の抽出率となる。又、寺泊・椎谷層の方は15~16°のメッシュ数は57で、当地区の寺泊・椎谷メッシュ数は339であるから、これと比べると当該地質の16.8%の抽出率、さらに当地区全体と比べると約3.4%のメッシュが抽出される。故に、この二層の計112メッシュ、全地区の約6.7%が次の臨界すべり面に供される。

2) 新井地区

スクリーニング1で抽出された貫入岩周辺斜面は西山層4メッシュ以外は、図2-10で最高のSiを示す寺泊・椎谷層であるから、スクリーニング2を通過し、図1-1のフロー通り臨界すべり面解析CSSDPによる詳細調査が必要とされる。関係する斜面は、60メッシュあり寺泊・椎谷層の約8.9%、全地区の3.6%に相当する。

さて図2-16より、スクリーニング2で抽出された寺泊・椎谷層の勾配別最大発生率は13~14°で、そのメッシュ数は76、当地区の寺泊・椎谷層メッシュ数は677あるので、これと比べると約11.2%が抽出されるが、当地区の全メッシュ数1,665と比べると約4.6%の抽出となる。一方、図2-16灰爪・西山層の最大発生率を有する勾配は17~18°であり貫入岩周辺4メッシュはこれに該当しないのでここでは抽出されない。

結局、前出の貫入岩周辺斜面の60メッシュとスクリーニング3で抽出された76メッシュの計136メッシュつまり全地区の約8.2%が次の臨界すべり面解析に供されることになる。ただし、貫入岩周辺斜面のうち寺泊・椎谷層の13~14°のメッシュが14あり、重複している。従って、実際に解析されるのは122メッシュとなり、結局、抽出率Rpは7.3%となる。

3) 長野県北部第三紀層地区

この地区において、スクリーニング1で抽出されたキャップロック（荒倉火砕岩）周辺のメッシュは63で、これは全地区の約4.0%に当たる。

次にスクリーニング2で抽出した境ノ宮、千現砂岩・泥岩層と高府泥岩層の勾配別Si最大値を図2-18より見ると、前者は33~34°の16メッシュ、後者は9~10°の5メッシュが抽出される。従って、計21メッシュつまり境ノ宮千現、砂岩・泥岩層及び高府泥岩層両層829メッシュの約2.5%、全地区1,593メッシュの約1.3%がスクリーニング3で抽出される。

故に、スクリーニング1で抽出されるキャップロック周辺斜面の63メッシュとスクリーニング3で抽出された上記21メッシュの計84メッシュ、すなわち全地区の約5.3%が次の臨界すべり面解析に供される。

4) 佐世保北部地区

スクリーニング1で抽出されたキャップロック（玄武岩）周辺のメッシュは148つまり全地区1,526メッシュの約9.7%である一方で、スクリーニング2より抽出された第三紀層のうち、勾配別の最大Siを持つ27~28°のメッシュ数は19でこれは第三紀層1,055の約1.8%、全地区1,526の約1.3%となる。従って、両者の計167メッシュ、つまり全地区の約10.9%が、臨界すべり面解析に供するものとなる。

結局このスクリーニング3においては、各地区全体に対し数%が抽出され、スクリーニング1で抽出された貫入岩・キャップロック周辺斜面とともに、やはり、各地区全体の5~10%程度が臨界すべり面解析に供される。

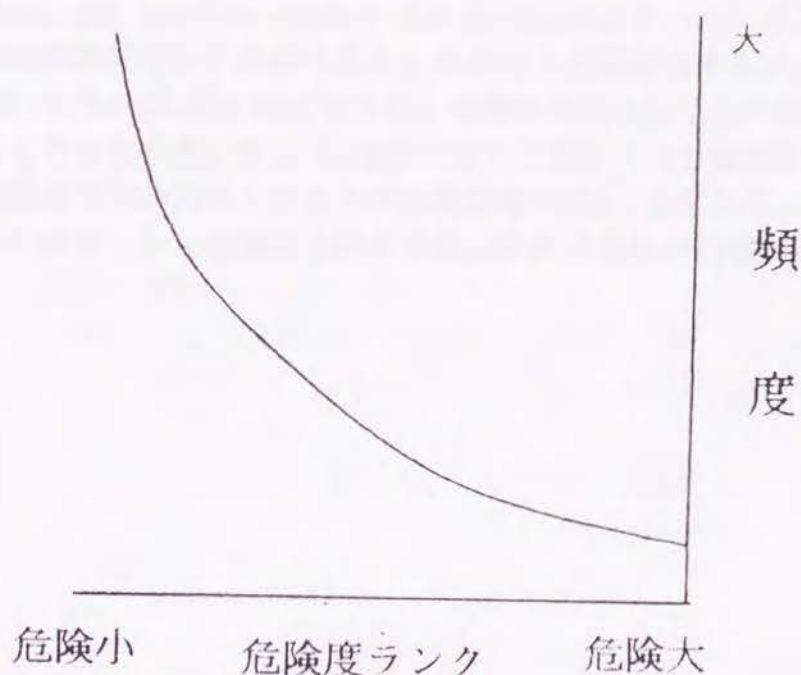


図2-20 斜面の危険度とメッシュ数(頻度)の関係

2. 8. まとめ

本章では、新潟県、長野県、長崎県から貫入岩等地質境界を有する4つのサンプル地区を選び、それぞれについて、地質(地層など)別の地すべり発生率(S_i)と勾配別の地すべり発生率を求めた。 S_i の値は貫入岩等の地質境界周辺斜面では、他の斜面より大きくなることや、地質別に S_i が異なること、勾配別に見ると S_i が最大となる勾配が存在することを利用し、第一段階から第三段階の危険度スクリーニングを実行した。

上記の第一段階から第三段階までの抽出(スクリーニング1~3)の結果を表2-1に総括した。これによると、スクリーニング1(図1-1の1))では抽出率 R_0 は数%、スクリーニング2(図1-1の2))では R_0 は数十%、さらに、スクリーニング3(図1-1の3))では、最終的に、スクリーニング1およびスクリーニング2によ

り抽出されたもののなかからの抽出率 R_p は数%となる。これによって、地質・勾配といった少ない要因によるスクリーニングが可能であることが示されたと考える。

また、本研究で考えている地形・地質因子に基づく抽出法による地すべり発生危険度区分は、図1-1のフローの図中3)に当たるスクリーニング3までで区分され、おのこの危険度ランクAからCと、そのランクに該当するメッシュ数(頻度)との関係について見れば、図2-20のように、危険度の大きいランクほどメッシュ数は少なくなると考えられる。そこで、次章で述べる臨界すべり面解析を用いた抽出法に基づく危険度判定の対象とするものは危険度の高い、すなわち、メッシュ頻度の少ないランクのメッシュを選ぶものとする。それは全体の約数%となるものと思われる。

3. 臨界すべり面解析による手法

3. 1. 臨界すべり面解析の流れ

臨界すべり面解析とは、与えられた地形地質、土質条件等を持つ斜面に対して最小の安全率を与えるすべり面を種々の安全率計算法（例えばJanbu法や簡便分割法など）を用いて探索する手法の事である。初生地すべりのように前歴がなく、すべり面が明確でない現象の解析には有効である。Leshchinsky (D. Leshchinsky et. al., 1985)や鶴飼（鶴飼恵三, 1985）の手法のように変分法を用い、求積的に最小安全率を持つすべり面つまり「臨界すべり面」をもとめる手法もあるが、この手法では臨界すべり面は対数螺旋解としてのみ与えられ、任意形状の臨界すべり面すなわち真の意味での最小安全率を持つすべり面は得られない。

ここでは、最近発展の著しいDP（動的計画法）理論を用いて探索範囲内で任意形状の臨界すべり面が得られ、種々の地層構造に適し得る方法を得た。

3. 2. 動的計画法を用いた臨界すべり面解析 (Critical Slip Surface Analysis by Dynamic Programming 略して、CSSDP)

1) 臨界すべり面解析の理論

①概要

臨界すべり面解析とは、与えられた地形、地質、土質条件等を持つ斜面の最小の安全率を与えるすべり面を探索する方法のことであり、変分法を用い、求積的に最小安全率を持つすべり面すなわち臨界すべり面を求める手法と、最近発展の著しいDP（動的計画法）理論を用いる手法に大別し得る。前者の手法では臨界すべり面は対数螺旋形としてのみ表現されるのに対し、後者の手法では探索範囲内で任意形状の臨界すべり面を取り得る。ここでは、後者のDP法を用いた手法を検討したので、以下後者の手法について述べる。

②動的計画法（DP）の概要

動的計画法（dynamic programming, 略してDP）とは、R. Bellman (1957)により開発された非線型数学的計画法である。これは、時間的一空間的多段階最適問題を取り扱うものである。この最適値すなわち極値を求める方法としては微分法や変分法などが有効であるが、多変数や微分不可能な関数を取り扱う場合は効果的でない。一方、この限界をクリアする為に開発された線型計画法（LP）は1次関数の極値を求めるものであるが、その関数が非線型を有する場合には使用できない。

DPは非線型を含む広範囲の多段階決定過程の解法として、これら古い手法よりはるかに進んだものである（鍋島一郎, 1968）。「初期の状態と最初の決定が何であろうとも、残った決定は最初の決定から生じた状態に関して最適政策を構成しなければならない」といった命題すなわち最適性原理に基づく、マルコフ性を持つ多段階決定過程がDPであり、これは、次の汎関数 G を最小化し、最小関数 f_0 を求めることに帰着する。マルコフ性とは、確率過程等の多段階過程の段階の決定もしくは、現象が、その直前の段階にのみ依存する性質を言う。

$$\begin{aligned} f_n &= \min \bar{G} = \min [\bar{G}_0 + \min_{i=1}^n \bar{\Sigma G_i}] \\ &= \min [\bar{G}_0 + f_{n-1}] \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$f_{n-1} = \bar{f}_n - \bar{G}_0 \quad (3.2)$$

ここで、 i は多段階決定過程の各段階、 \bar{G}_0 は \bar{G} の利得(return)、 f_n は求める最小汎関数。

動的計画法の概念を把握する意味で、Bakerがその論文に述べているDPのalgorithmの説明を次に述べる。

図3-1に見られる簡単な例を使いDPの計算手続きを明確にすると分かり易い。この図は、点Aと点Bを結ぶ道路網を図示したものであり、道路各交点間を移動するに要する時間を図3-1(a)の各交点間に示してある。AからBへ行くのに最小の移動時間 T_s で済む経路を求める。図3-1(a)の下部に示す1から7のステージを用いて、AからBの経路を考えると良い。各交点(各状態)はそのステージ(Stage)数とポジション(position)数を用いて分別され、例えば図3-1(a)のd点はステージ4の上から2番目の頂点を意味して(4,2)と書ける。ある交点(i, j)から次の交点($i+1, k$)へ移動するのに要する時間は図3-1(a)中の $DT_3(1,2)$ のように、 $DT_i(j, k)$ と指定される。すなわち、

$$DT_i(j, k) = P(i, j) \rightarrow P(i+1, k) \quad (3.3)$$

$$DT_3(1, 2) = c(3, 1) \rightarrow d(4, 2) = 3 \quad (3.4)$$

$$(i=3, j=1, i+1=4, k=2)$$

ここで、 i はステージ数、 j はポジション数、式中の矢印は移動方向を表す。(図3-1(c)参照)

$H_i(j)$ を点A(1,1)からある交点(i, j)へ移るに要する最小時間と置くと、 $H_i(j)$ は最適値関数(optimal value functions)と呼ばれる。

最適値関数の定義とA(1,1)そしてB(7,1)の指定より、明らかに $H_1(1)=0$, $H_7(1)=T_s$ 。計算は、図3-1(b)の点A頂点(1,1)で $H_1(1)=0$ と置くことより始められ、この点からは、(2,1)へも(2,2)へも移動可能であるので、そのどちらかが最小経路上にあるのかは前もって分からない。従って、 H_2 は、

$$H_2(1) = H_1(1) + DT_1(1,1) = 0 + 2 = 2$$

$$H_2(2) = H_1(1) + DT_1(1,2) = 0 + 1 = 1$$

これらの値とそれを生む移動方向は図3-1(b)に示されている。

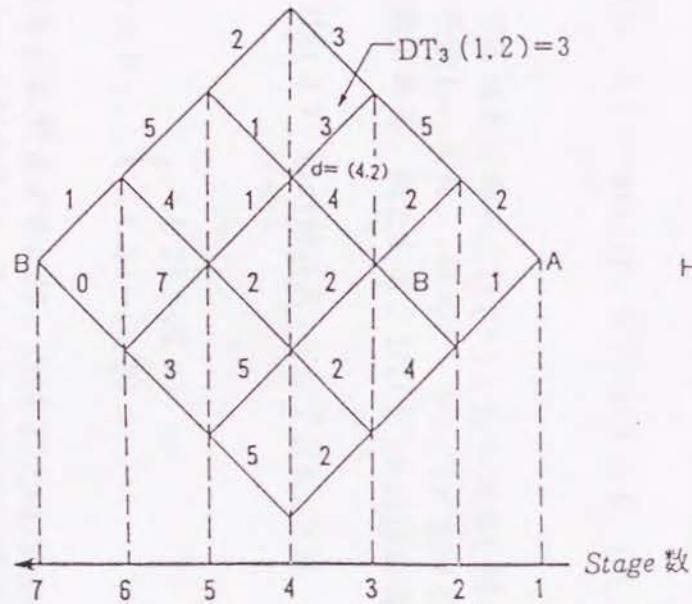
ステージ3において3つの交点のうちどれが最小経路上にあるかを知ることにはできないが、Aから各点への最小移動時間は計算できる。Aから(3,1)への移動時間は、Aから(2,1)と(2,1)から(3,1)への時間の和である。すなわち、

$$H_3(1) = H_2(1) + DT_2(1,1) = 2 + 5 = 7$$

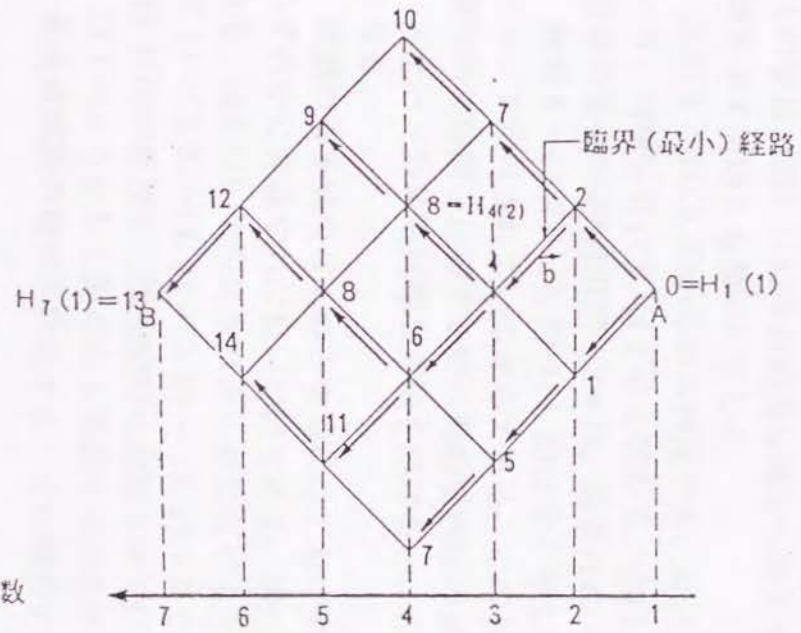
同様に、

$$H_3(2) = H_2(2) + DT_2(2,2) = 1 + 8 = 9$$

$$H_3(3) = H_2(2) + DT_2(2,3) = 1 + 4 = 5$$



(a) 最短移動時間問題



(b) 動的計画法の解

時間 = 3
 $c = (3, 1)$
 上から一番目
 でステージ3
 の点。
 $d = (4, 2)$ (c)

図 3-1 動的計画法説明図

点(3, 2)は(2, 1)あるいは(2, 2)からも到達でき、Aから(3, 2)への移動時間はそれぞれ、 $A \rightarrow (2, 1) \rightarrow (3, 2)$ に対して、

$$H_2(1) + DT_2(1, 2) = 2 + 2 = 4$$

$A \rightarrow (2, 2) \rightarrow (3, 2)$ に対して、

$$H_2(2) + DT_2(2, 2) = 1 + 8 = 9$$

それ故、Aから(3, 2)への最小所要時間は4で、それは上方の経路で得られる。4の値は、図3 1(b)中の適当な場所へ導入される。(2, 1)から(3, 2)への経路の最小値を示す矢印bも図中に示した。

交点(3, 3)は(2, 2)からのみ到達でき、 $H_3(3) = H_2(2) + DT_2(2, 3) = 1 + 4 = 5$ 、同様に $H_4(1)$ は10と分かる。点(4, 2)は(3, 1)あるいは(3, 2)から到達でき、前者の場合所要時間は $7 + 3 = 10$ 、後者は $4 + 4 = 8$ であり、従って $H_4(2) = 8$ である。

経路 $A \rightarrow (2, 2) \rightarrow (3, 2) \rightarrow (4, 2)$ は全く考えなくても良い、というのは、初期のステージで除外されているからである。このある経路の除外操作はあらゆる可能な経路の所要時間を比較する際の動的計画法の長所である。

ステージ6にも同様な方法が続けると、 $H_6(1) = 12$ 、 $H_6(2) = 14$ (図3 1(b))となる。

問題の解を完全なものとするには、もはや $H_7(1)$ の値を $12 + 1 = 13$ 、 $14 + 0 = 14$ のいずれかに計算すれば良いだけである。明白に $H_7(1) = 13 = T_5$ が最小所要時間である。図3 1(b)の矢印をBから逆になぞると、最小経路(critical path)は、 $A \rightarrow (2, 1) \rightarrow (3, 2) \rightarrow (4, 3) \rightarrow (5, 2) \rightarrow (6, 1) \rightarrow B$ であることが分かる。本手法では、この図3 1(b)の経路を三次元配列に記憶させている。

以上のようにして得られる算法を定式化すると、最小化の問題は次の関係を用いて最適値関数の数列を決定することに帰着する。すなわち、

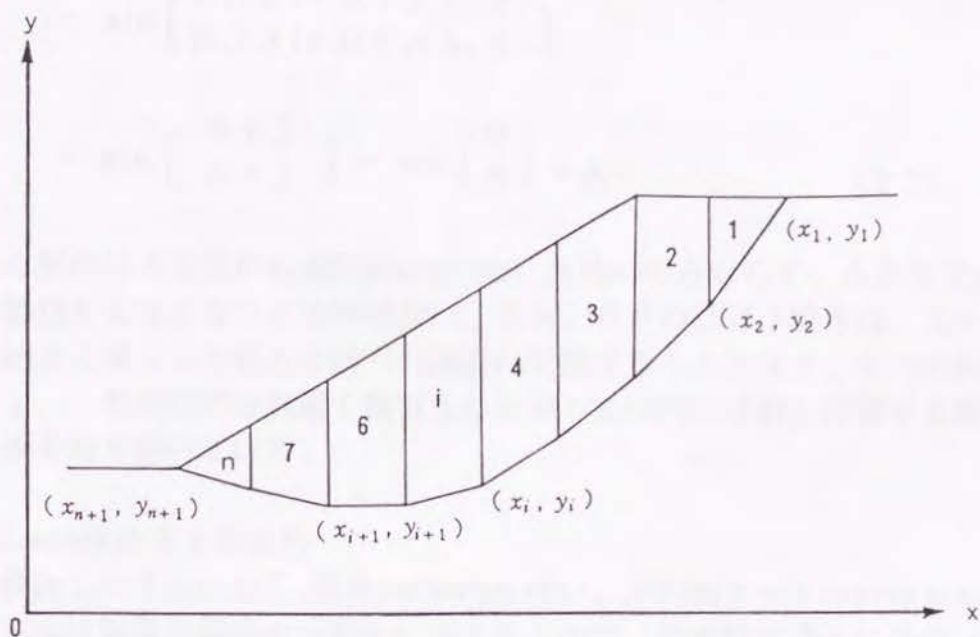
$$H_{i+1}(j) = \min_{\substack{K \\ j=1, \dots, KK_{i+1}}} [H_i(K) + DT_i(K, j)] \quad (3.5)$$

ここでKはそこから点 $[(i+1), j]$ へ到達し得るステージiにおける可能なすべての交点を表し、 KK_{i+1} はステージi+1における交点数を表す。また、(i+1)はステージ数である。例として、 $H_5(2)$ の計算を考えよう。

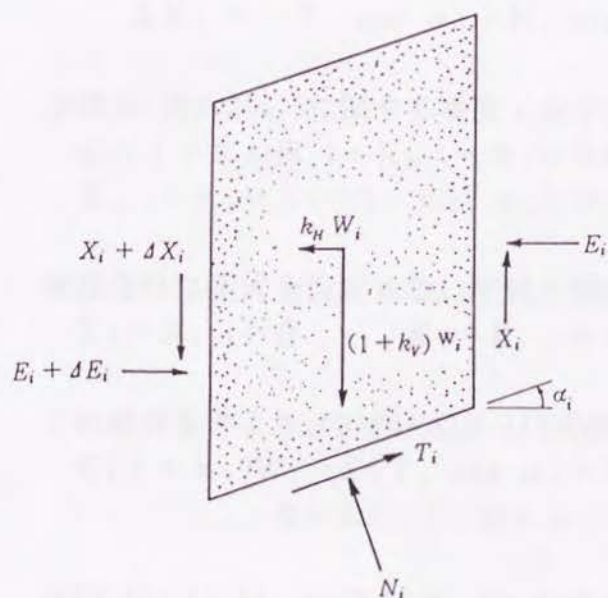
$$H_5(2) = \min_{K=2, 3} \{H_4(K) + DT_4(K, 2)\} \quad (3.6)$$

$$\text{when } \begin{cases} (4, 2) \rightarrow (5, 2) & \text{or} \\ (4, 3) \rightarrow (5, 2) \end{cases}$$

点(5, 2)に到達するには、点(4, 2)と(4, 3)が考えられる(図3 1(b))。従って、Kは、1~4があるが、そのうち点(5, 2)に到達するのは $K = 2, 3$ である。



(a) 地すべり土塊



記号の定義

W_i	自重
E_i	水平力
X_i	せん断力
N_i	すべり面に作用する垂直力
T_i	すべり面に作用する抵抗力
k_H	水平震度
k_V	垂直震度

(b) スライス i に作用する力

図 3-2 地すべり土塊及びスライス説明図

$$\begin{aligned}
 H_5(2) &= \min_{K=2,3} \{H_4(K) + D T_4(K, 2)\} \\
 &= \min \left\{ \begin{array}{l} H_4(2) + D T_4(2, 2) \\ H_4(3) + D T_4(3, 2) \end{array} \right\} \\
 &= \min \left\{ \begin{array}{l} 8+1 \\ 6+2 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 9 \\ 8 \end{array} \right\} = 8
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

得られた解法はA B間の最適経路(optimal paths)のみならず、Aと各交点(i, j)間の最適経路をも与えることは興味深い。事実、D Pの計算手続きは、元々の問題を共通の始点と異なった終点を持つ問題族に変換することにより、すべてのポジション番号(y_i : 類似の変分問題を離散化した型)を同時に選択し計算する総当たり計算の必要を取り除いている。

③簡便Janbu法の安全率関数

上述で検討した手法に加え、簡便Janbu法を用い、非円弧すべりの計算を可能とした。この方法は極限平衡法の分割法に属するもので、次の様な考えに基づいている。

まず図3-2(a)のような地すべり土塊を考え、かつ、その土塊中のi番目のスライスに働く力を図3-2(b)のように定義する。スライスiに垂直・水平方向に働く力の釣合式は、図中の記号を用いて、次のように表される。

$$(1 + k_v)W_i + \Delta X_i = T_i \sin \alpha_i + N_i \cos \alpha_i \tag{3.8}$$

$$\Delta E_i = -T_i \cos \alpha_i + N_i \sin \alpha_i + k_h W_i \tag{3.9}$$

全体系(図3-2(a))に関する垂直・水平方向の力の釣り合い式は、

$$\Sigma \{(1 + k_v)W_i\} + X_{n+1} - X_1 = \Sigma (T_i \sin \alpha_i + N_i \cos \alpha_i) \tag{3.10}$$

$$E_{n+1} - E_1 = \Sigma (-T_i \cos \alpha_i + N_i \sin \alpha_i + k_h W_i) \tag{3.11}$$

境界条件は次式を仮定する。滑動土塊端部で、

$$X_1 = X_{n+1} = 0, \quad E_1 = E_{n+1} = 0 \tag{3.12}$$

この境界条件より、(3.10)式(3.11)式は次のようになる。

$$\Sigma (1 + k_v)W_i = \Sigma (T_i \sin \alpha_i + N_i \cos \alpha_i) \tag{3.13}$$

$$0 = \Sigma (-T_i \cos \alpha_i + N_i \sin \alpha_i + k_h W_i) \tag{3.14}$$

式(3.13), (3.14)に(3.8)式、(3.9)式を代入して、

$$\Sigma \Delta X_i = 0 \tag{3.15}$$

$$\Sigma \Delta E_i = 0 \tag{3.16}$$

一方、(3 8), (3 9)式より N_i を消去して、

$$\Delta E_i = \{(1 + k_v)W_i + \Delta X_i - T_i \sin \alpha_i\} \tan \alpha_i - T_i \cos \alpha_i + k_H W_i \quad (3 17)$$

式(3 17)を式(3 16)に代入すると、

$$T_i (\tan^2 \alpha_i + 1) \cos \alpha_i = T_i \sec^2 \alpha_i \cdot \cos \alpha_i \quad \text{であるから、} \\ \Sigma [(1 + k_v)W_i + \Delta X_i] \tan \alpha_i + k_H W_i = \Sigma T_i \sec \alpha_i \quad (3 18)$$

一方、クーロンの破壊条件より

$$T_i = \{c_i' l_i + (N_i - U_i l_i) \tan \phi_i'\} / F_0 \quad (3 19)$$

さらに式(3 8)を N_i について解くと

$$N_i = \{(1 + k_v)W_i + \Delta X_i - T_i \sin \alpha_i\} / \cos \alpha_i \quad (3 20)$$

式(3 19), (3 20)を代入すると

$$F_s T_i = \\ [c_i' l_i \cos \alpha_i + \{(1 + k_v)W_i + \Delta X_i - U_i l_i \cos \alpha_i\} \tan \phi_i' - T_i \tan \alpha_i \tan \phi_i'] / \cos \alpha_i \quad (3 21)$$

よって T_i は

$$T_i = \frac{c_i' l_i \cos \alpha_i + \{(1 + k_v)W_i + \Delta X_i - U_i l_i \cos \alpha_i\} \tan \phi_i'}{F_s \sec \alpha_i n_{\alpha i}} \quad (3 22)$$

ここに、

$$n_{\alpha i} = \cos^2 \alpha_i \{1 + \tan \alpha_i \tan \phi_i' / F_s\} \quad (3 23)$$

式(3 22)を式(3 18)に代入すると

$$F_s = \frac{\Sigma [c_i' l_i \cos \alpha_i + \{(1 + k_v)W_i + \Delta X_i - U_i l_i \cos \alpha_i\} \tan \phi_i'] / n_{\alpha i}}{\Sigma [(1 + k_v)W_i + \Delta X_i] \tan \alpha_i + k_H W_i} \quad (3 24)$$

ここで、簡便Janbu法の仮定を導入する。

すなわち、

$$\Delta X_i = 0 \quad (3 25)$$

つまり、スライス間の垂直抵抗力を一定としても実用上さしつかえないとする仮定である。

$$F_s = f_0 \frac{\Sigma [c_i' l_i \cos \alpha_i + \{(1 + k_v)W_i - U_i l_i \cos \alpha_i\} \tan \phi_i'] / n_{\alpha i}}{\Sigma [(1 + k_v)W_i \tan \alpha_i + k_H W_i]} \quad (3 26)$$

上式はまた次のように書き改められる。

$$F_s = f_0 \cdot \Sigma A_i / \Sigma B_i \quad (3 27)$$

ここに A_i : 抵抗成分, B_i : 滑動成分。

$$A_i = [c_i' l_i \cos \alpha_i + \{(1 + k_v)W_i - U_i l_i \cos \alpha_i\} \tan \phi_i'] / n_{a_i} \quad (3-28)$$

$$B_i = (1 + k_v)W_i \tan \alpha_i + k_H W_i \quad (3-29)$$

また、修正係数 f_0 は次式で与えられる。(中 潤植・板垣 治: 1983)

$$f_0 = (50d/L)^{0.03} \quad (3-30)$$

ここに L は直線距離で測ったすべり斜面長、 d はすべり斜面長に平行でかつすべり面に接する直線との間の距離である。

なお、本解析では、すべり面の間隙水圧のとり方は地下水面下の土重量を有効重量で計算する方法をとる。この結果、式(3-28)は次のように書き改められる。

$$A_i = [c_i' l_i \cos \alpha_i + (W_i + k_v W_i) \cdot \tan \phi_i'] / n_{a_i} \quad (3-31)$$

この安全率の式は F_s について陽に定義されていないので、反復試算法により安全率を求める。まず、安全率の初期値 F_{s0} を仮定し、(3-27)式等を用いて新しい安全率 F_s を計算する。その結果、 $F_s - F_{s0}$ の絶対値が許容誤差 ε 以下にならなければ、改めて F_s を計算し、 F_s が収束するまで計算する。 f_0 も初期値 1 から始めて反復計算の過程でそのすべり面に対する f_0 を求め直して計算することとした。

④動的計画法を用いた臨界すべり面解析手法 (R. Baker, 1980)

a. 最小化の理論

上記の安全率関数を最小化する手続きを図3-3に示したが、 DP が加法的関数 (additive functions) のみに応用できることについて着目すれば、その関数形は次のようである。

$$\overline{T} = \sum_{i=1}^n t_i \quad (3-32)$$

これは、古典的手法である変分法におけるEuler方程式に見られる「線型汎関数 (linear functionals)」(次式) と類似の関係となる。

$$\overline{T} = \int t[x; y(x)] dx \quad (3-33)$$

しかし、安全率関数 F_s は加法的関数ではないので、次の補助汎関数 G を用いて、最小化を行なう。

$$\overline{G} = \sum (A_i - F_s \cdot B_i / f_0) = \overline{A} - \overline{F_s B} / f_0 \quad (3-34)$$

この G を最小化することは、 F_s を最小にすることと同じである。

さて安全率関数 F_s は、すべり面の関数となるので、すべり面関数に対し、安全率汎関数 F_s を与える事ができる。すなわち、 F_s を最小化する手続きは以下のように定式化される。

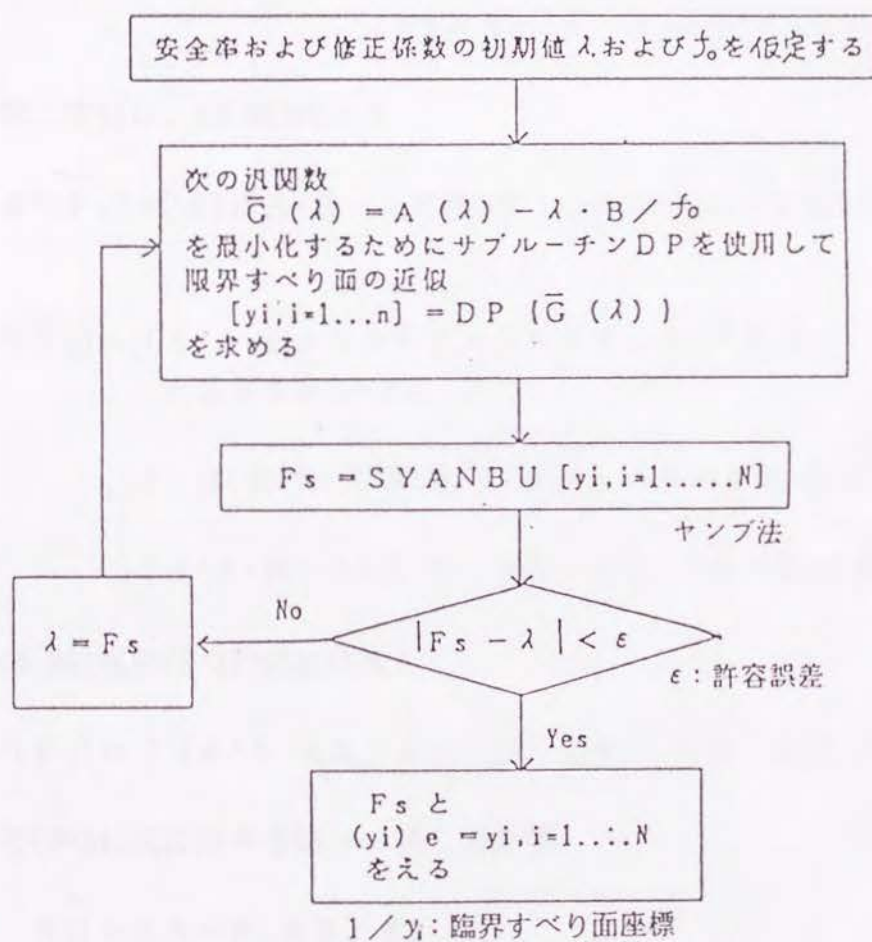


図 3-3 限界すべり面を求める手続

$$F_s = \min_{y(x)} \overline{F_s\{y(x)\}} = \overline{F_s\{y_e(x)\}} = f_0 \frac{\overline{A\{y_e(x)\}}}{\overline{B\{y_e(x)\}}} \quad (3.35)$$

$y_e(x)$ は最小安全率を持つすべり面関数で臨界すべり面と呼ばれる。AとBは抵抗成分と滑動成分の和である。

ところで、(3.32)式は(3.33)式の数学的近似であることから変分原理を用いて、(3.34)と(3.35)式の間係を検討する。F_sの変分δを取ると、

$$\begin{aligned} \delta F_s &= \{\delta A \cdot B - A \delta B\} \cdot f_0 / B^2 \\ &= \{\delta A - (A/B) \delta B\} f_0 / B \end{aligned} \quad (3.36)$$

第二変分は、(3.36)式より

$$\delta^2(F_s) = [\delta\{\delta A \cdot B - A \delta B\} B^2 - \{\delta A \cdot B - A \delta B\} \delta(B^2)] \cdot f_0 / B^4 \quad (3.37)$$

$$\delta^2(F_s) = [(\delta^2 A \cdot B + \delta A \delta B - \delta A \delta B - A \delta^2 B) B^2 - (\delta A \cdot B - A \delta B) - 2 B \delta B] \cdot f_0 / B^4$$

$$(\because \delta(B^2) = (\delta(B^2)/\delta B) \delta B = 2 B \cdot \delta B)$$

$$= [\delta^2 A \cdot B - A \delta^2 B - 2\{\delta A \delta B - (A/B) \delta B^2\}] f_0 / B^2 \quad (3.38)$$

(3.36)式を(3.37)式に代入し、

$$\delta^2(F_s) = [\{\delta^2 A - (A/B) \delta^2 B - 2 \delta F_s \delta B / f_0\} f_0] / B \quad (3.39)$$

一方(3.34)式に対する第一、第二変分は、

$$\delta G = \delta A - F_s \delta B / f_0 \quad (3.40)$$

$$\delta^2 G = \delta^2 A - F_s \delta^2 B / f_0 \quad (3.41)$$

F_sおよびf₀はこの場合すべり面関数に無関係な係数である。

任意汎関数Γに対する最小の条件は、変分法より

$$\delta(\Gamma)_e = 0, \quad \delta^2(\Gamma)_e > 0 \quad (3.42)$$

添字eは臨界すべり面を意味する。

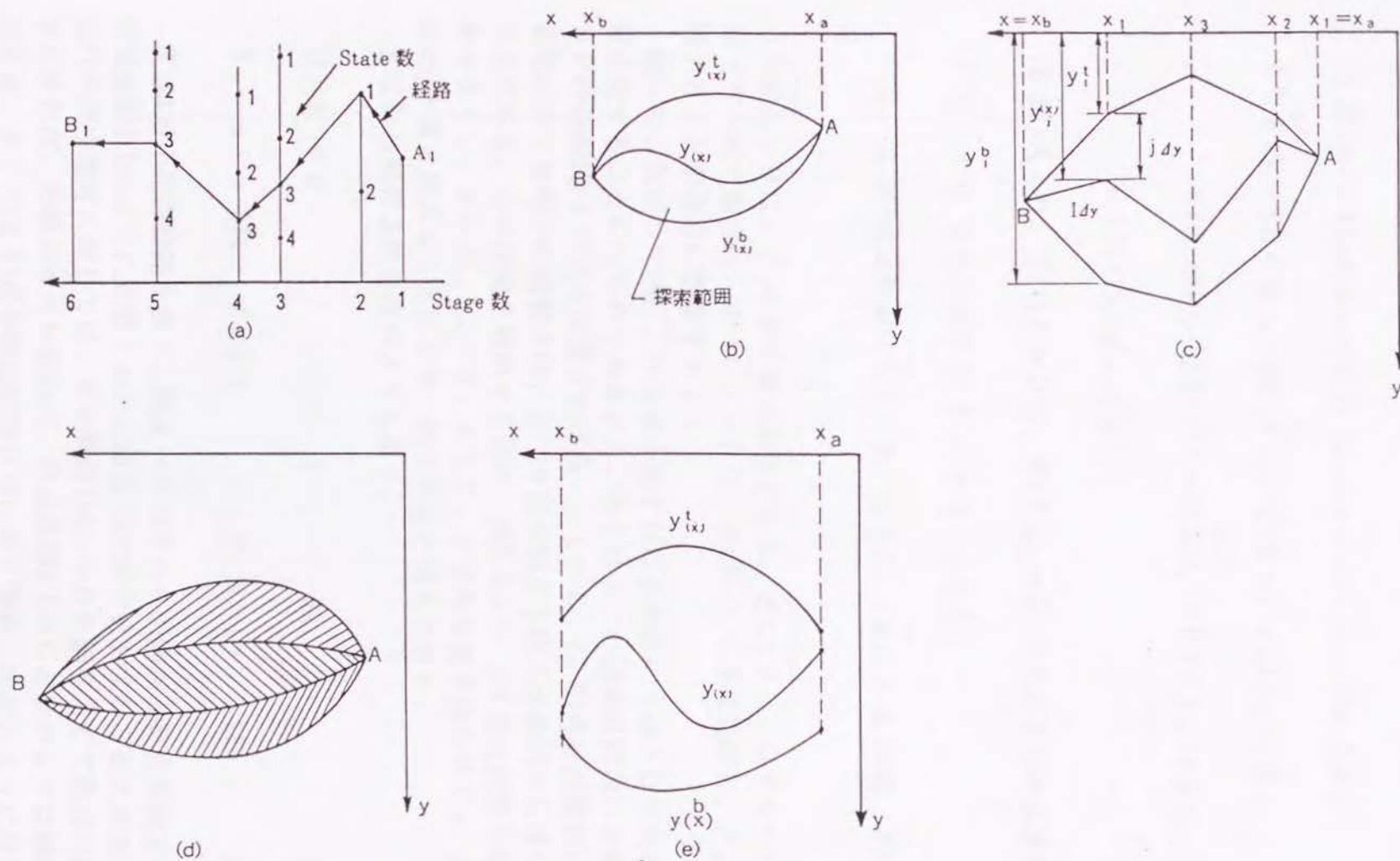


図 3-4 変分問題と動的計画問題の等価性

(a) 抽象的動的計画問題, (b) 等価の変分問題, (c) 変分法の離散化
(d) 分割された探索領域, (e) 種々の端点を持つ変分問題

(3 36)式と(3 40)式より、

$$\overline{\delta(F_s)_e} = f_0 \overline{\delta(G)_e} / \overline{(B)_e} \quad (3 43)$$

(3 39)と(3 41)式ならびに(3 42)式より $\overline{\delta(G)_e} = 0$ を考えて、

$$\begin{aligned} \overline{\delta^2(F_s)_e} &= \{ \overline{\delta^2(G)_e} - 2 \overline{\delta(F_s)_e} \cdot \overline{\delta(B)_e} / f_0 \} f_0 / \overline{(B)_e} \\ &= \{ \overline{\delta^2(G)_e} - 2 \overline{\delta(G)_e} \cdot \overline{\delta(B)_e} / \overline{(B)_e} \} f_0 / \overline{(B)_e} \\ &= \overline{\delta^2(G)_e} \cdot f_0 / \overline{(B)_e} \end{aligned} \quad (3 44)$$

(3 43)式より、 $\overline{\delta(G)_e} = 0$ は、 $\overline{\delta(F_s)_e} = 0$ であることの必要条件であり、

$\overline{\delta(G)_e} = 0$ ならば必ず $\overline{\delta(F_s)_e} = 0$ となる。

一方、(3 44)式より $\overline{\delta^2(G)_e} > 0$ ならば、 $\overline{(B)_e} > 0$ の時、 $\overline{\delta^2(F_s)_e} > 0$ となり、

$\overline{\delta^2(G)_e} > 0$ は、 F_s の最小値の条件となる。逆に $\overline{(B)_e} < 0$ すなわち滑動成分が斜面上方へ向く場合は、 $\overline{\delta^2(G)_e} > 0$ は、 $\overline{\delta(F_s)_e} < 0$ に対応し、 F_s の最大値に一致することが容易に想像できよう。

従って、前述した様に、 G を最小化すれば必然的に $(B > 0$ である限り) F_s を最小化することになるのであるから、あとは、この補助汎関数 G を最小化する為にDPの基礎式(3 5)式を演算すれば良い。しかし、(3 5)式を汎関数 G に直接適用する際に生じる唯一の困難さは、すべり面の始点と終点が最初からは分からないと言う点にある。この問題を解消する為に、図3 4(b)に示す変分問題を端点の要求条件をゆるくし、 $X = X_0$ 、 $X = X_n$ 、そして、 y をある幅を持たせて $y^1 \leq y \leq y^2$ (図3 4(e))と置き換えることにより一般化すると便利である。

すなわち境界条件を次のように置く。

$$H_1(K) = 0 \quad \text{ここで、} K = 1 \cdots KK_1 \quad (3 45)$$

$$T_s = \min [H_{n+1}(k)] \quad \text{ここで、} K = 1 \cdots KK_{n+1} \quad (3 46)$$

T_s は最小利得経路を表す。地すべりのすべり面始点と終点を決定する為に、検索域を図3 5のように定義すると、斜面外の部分をも含むことになる。従って、斜面外の空中部分に対しては、ゼロ利得 $DG_i = 0$ を割り当てて前述の計算を行うことにすれば、実際のすべり面始点、終点は図3 5のCとDのように解の一部として求まる。そこで(3 5)式を補助関数 G 用書き改め、次のように計算できる。

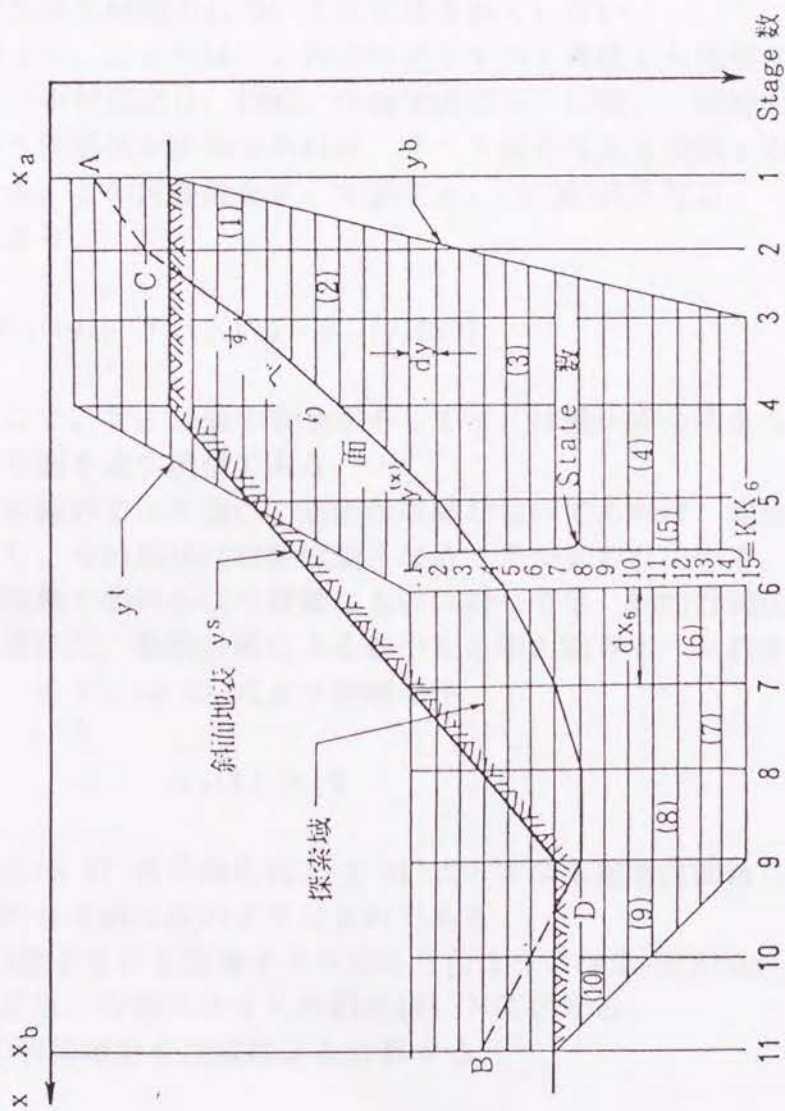


図 3-5 動的計画法に対する斜面の離散化模式図

$$G_{i+1}(j) = \min \{G_i(K) + D G_i(K, j)\}, \quad K=1 \cdots KK_i \quad (3.47)$$

ここで、 $D G_i$ を利得(return)と呼ぶ。

b. 計算手法

前節に述べた最小化の理論や境界設定法に基づいて、山上ら、荒井ら、などは (T. Yamagami et al. 1986, K. Araki et al. 1985) 簡便Janbu法を用いてここで述べているのと類似の解析を行っている。しかし、前者の場合は安全率修正係数 f_0 が検討されておらず、後者は境界条件に前節で述べたBaker流(R. Baker, 1980)の拡張を検討していない。さらに、両者とも上に凸で異常な臨界すべり面発生に対する制約条件と地震力については考慮されていない。

従って、ここでは、これらの点をすべて考慮した臨界すべり面計算手法を開発した。(中村浩之ら, 1987、久保田哲也ら, 1991) 前述の③で述べた安全率関数は、すべり面形状が未知であればすべり面を与える関数 y の関数であり安全率汎関数となる。この汎関数を F_s で表すと、(3.35)式となる。

つまり、

$$F_s = \min_{y(x)} \overline{F_s\{y(x)\}} = \overline{F_s\{y_e(x)\}}$$

ここで、 F_s は最小安全率そして y_e は最小安全率を与えるすべり面つまり臨界すべり面を表す座標である。

この臨界すべり面は、斜面が単純なものであれば、変分法により古典的な手法で求まり、その形状は対数螺旋となることが知られている。しかし、ここで取り扱う多層地盤で幾何形状の複雑なものに対しては、動的計画法が最適であることは繰り返し述べた。動的計画による最小安全率と臨界すべり面を求めるには次式を基本とする。まず、(3.45)式より初期条件

$$\overline{G_1(K)} = 0 \quad (3.48)$$

これと(3.47)式の漸化式と(3.34)式の安全率補助汎関数 G を用い、計算を実行する。具体的な手順は次のようなものである。

(1) 想定される臨界すべり面を含むように探索点(Stage, State)を設ける。この探索点は、分割スライスの鉛直線に対応させる。

(2) 利得増分を次式により計算する。

$$d G_{i+1} = A_i - F_{s0} B_i / f_0 \quad (3.49)$$

F_{s0} は安全率の初期値。

(3) 利得の初期化を(3.48)式より行う。

(4)(3 47)式を用い、最小利得を計算し、その経路を記憶させておく。

(5)最終 Stage で最小利得となっている State を探す。

(6)一つ前の Stage における最小利得経路をメモリーより呼び出し臨界すべり面を求める。同時に安全率を与える。

ただし、異常なすべり面形状を制約する次の条件式を選択できるようにした。

すなわち、

$$(d^2y/dx^2)_i \geq 0 \quad (i=1 \cdots n, n: \text{スライス数}) \quad (3 50)$$

一方、(3 22)式簡便Janbu法の式中の $n_{\alpha i}$ が負になることで生じる現実には存在し得ないすべり面、つまり、すべり面抵抗力 T_i (図 3 2)が負となるようなすべり面を排除する為に、

$$n_{\alpha i} > 0 \quad (3 51)$$

すなわち、 $\cos^2 \alpha_i > 0$ であるから、(3 22)式より、

$$Fs > -\tan \alpha_i \tan \phi_i' \quad (3 52)$$

なる条件を付する。

2) 臨界すべり面解析プログラム (CSSDP)

(中村浩之ら 1987、久保田哲也ら 1991)

2)-1 プログラムの解析機能、適用限界など

a. 解析機能

本プログラムは、斜面、盛土等の臨界すべり面を求め、その安全率を計算するものである。解析に必要なデータは、斜面および地層の幾何データ、地盤の単位体積重量、土質強度定数 (c , ϕ) であるが、地下水位ならびに、地震力 (水平・垂直震度) を与え間隙水圧上昇時、あるいは、地震時の解析も可能である。

解析結果としては、臨界すべり面の位置と最小安全率が与えられる。その他に各帯片の自重、浮力、滑動力、抵抗力などが出力される。さらに、臨界すべり面の位置と各帯片の滑動力と抵抗力のベクトル図が図化出力される。

b. 適用限界

本プログラムは、あくまで二次元の極限平衡解析に立脚したものであり、当然、解析対象もその特性に沿ったものとなる。このプログラムでは、多層地盤をも取扱い得るが、極めて極端な地層境界や地表条件 (垂直な崖のようなもの) では正しい解を得られるとは限らない。また、得られた臨界すべり面は、与えた探索範囲内で最小安全率を持つものであり、探索範囲内の取り方によっては、異なる解が存在する。従って、すべり面探索範囲は、斜面の現状を把握し、妥当なものとせねばならない。さらに、探索範囲内に広範囲に亘って地表が存在すると、地表線が最小安全率を有する臨界すべり面となることがあるので、注意を要する。加えるに、安定解析計算手法が簡便 Janbu法である点も留意し、解析結果を評価すべきである。この点については、後述の検証計算で Spencer法と比較した。

2)-2 計算の流れとプログラムの構成

a. 計算の流れ

図 3-3に本プログラムの主要な解析の流れを示してある。まず、安全率の初期値と入力データよりすべての帯片内の可能なすべり線に対し利得増分を計算する。その後、この利得増分を用いて臨界すべり面を求め、このすべり

面に対して安定計算を行い安全率 F_s を得る。この安全率が初期値が許容誤差 ε 以下で一致すれば、結果の出力を行い、もしそうでなければ、求めた安全率を初期値に入れ替えて、 ε 以下になるまで再度繰り返し計算を行う。

b. サブルーチンの機能 (図 3-6)

CSSDP1: 主プログラム

INPUTD: データの入力

PRDATA: データのプリンター出力

DP: 動的計画法に基づく臨界すべり面探索

SJANBU: 簡便 Janbu法による安定計算

GEOMET: すべり面、地層線の座標、帯片の地層ごとの細分割、異常なすべり面の排除

FSPARA: 修正係数 f_o (図 3-7)

選択子が off で、 $f_o = 1.0$

選択子が on で、 $f_o = (50d/L)^{0.03}$

ここで、 L はすべり面斜面長、 d は L の直線と L に平行なすべり面に接する直線との最大距離。

POST: 出力用のポストプロセッサー

ORESUL: プリンター出力

OFIL: 図化処理ポストプロセッサー

PLOT: 図化出力

DASH: 破線描画

AROH: 矢印描画

c. 入出力ユニットとシステムの流れ

このプログラムは、3つのユニットを使用する。それぞれ、ユニット番号 #5 はカードリーダー (あるいは、ファイル)、#6 はラインプリンター、#16 は X-Yプロッタ (あるいは、レザープリンター) である (図 3-8)。

2)-3 検証計算例

本プログラムが正常に稼働するかどうか検証する目的で、既往の研究より得られている事例について計算し、比較を行った。

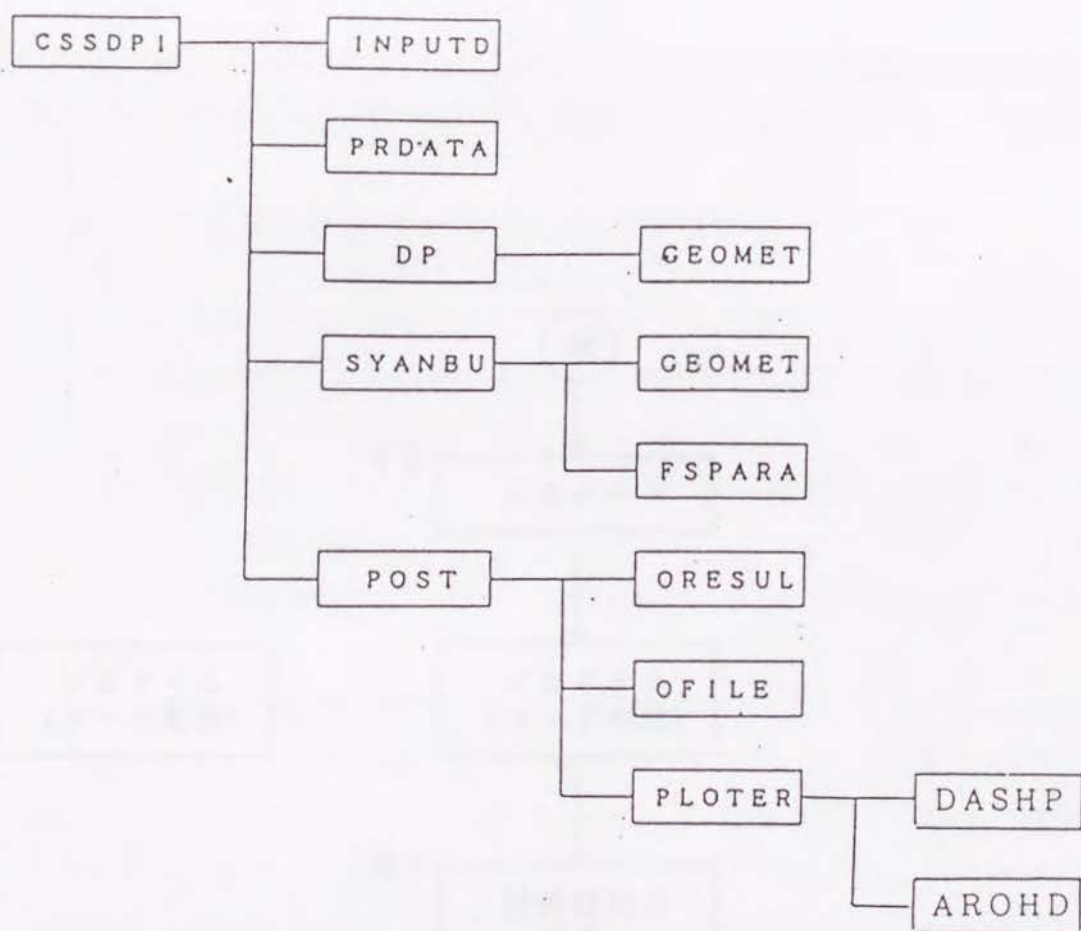


図 3-6 CSSDP 1 のサブルーチンツリー

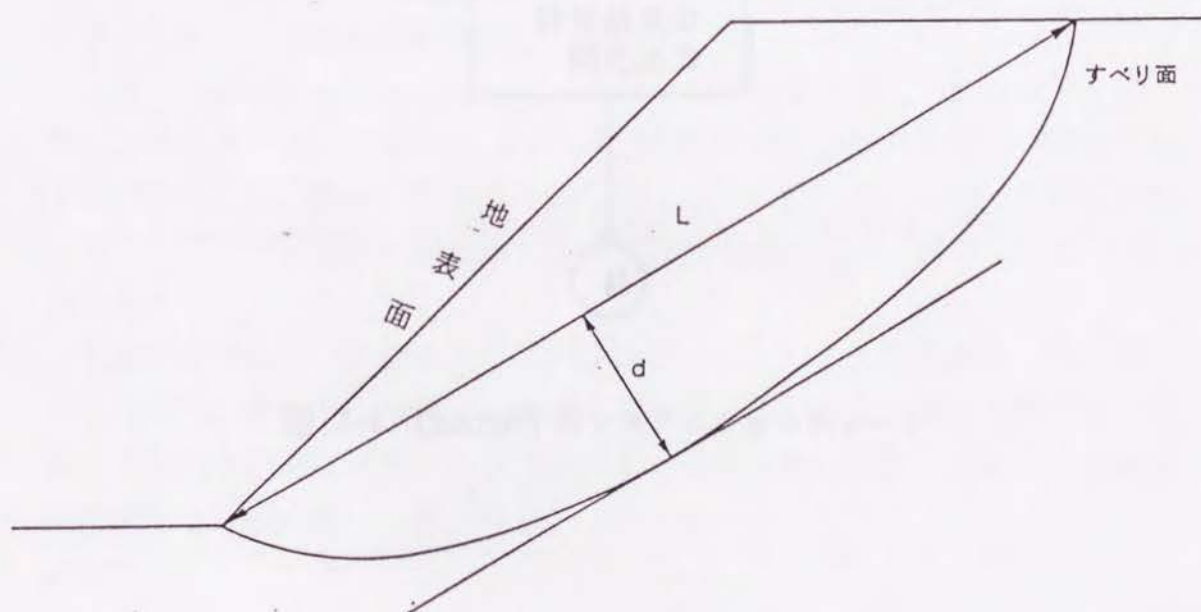


図 3-7 f_0 の説明図

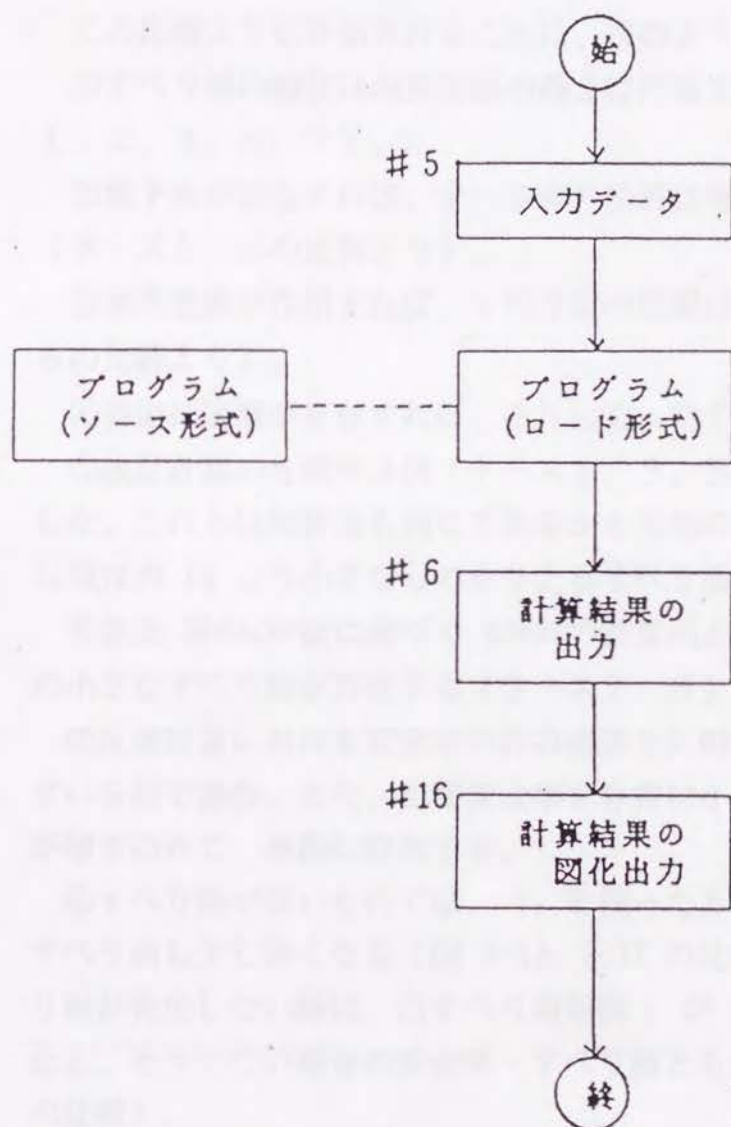


図 3-8 CSSDP 1 のシステムフローチャート

検証には、8例用いたが、これらは、ほぼ同じ手法の山上らの計算例と、修正 Spencer法に基づく Bakerの計算例である。ただし、 $f_0 = 1.0$ としている。

各ケースの計算結果を図 3-9～図 3-18 に示す。

この比較より引き出されることは、次のようである。

①すべり面の形状は均質断面の場合は円弧よりも対数螺旋に近い（ケース 1, 2, 3, 5, 7）。

②地下水が存在すれば、すべり面の位置は地下水が無いときより深くなる（ケース 1, 2 の比較より）。

③水平震度が作用すれば、すべり面の位置はさらに深くなる（ケース 2, 6 の比較より）。

④斜面に弱層が存在すれば、それに沿ったすべり面となる（ケース 4, 8）

⑤検証計算の8例中3例（ケース 1, 3, 5）は、既往の計算結果と一致した。これらは解析法も同じであるから当然の結果と言えるが、多層断面では既往の F_s より小さなものを与えるすべり面が存在する（ケース 4）。

⑥修正 Spencer法に基づく Bakerの計算例と比較した場合も、さらに F_s の小さなすべり面が存在する（ケース 7, 8）。

⑦反復計算における安全率の許容誤差を0.001 とした場合、反復回数はせいぜい5回で済む。また、初期安全率を非常に小さく仮定しても多少反復回数が増すのみで、単調に収束する。

⑧すべり面が深いものでは、 f_0 を使った方が安全率は大くなり、臨界すべり面も少し深くなる（図 3-9 と 3-17 の比較）。また、凸で異常なすべり面が発生しない時は、凸すべり面規制（ $d^2 y/dx^2$ ） ≥ 0 を課した場合と、そうでない場合の安全率・すべり面とも差がない（図 3-17 と 3-18 の比較）。

しかしながら、 d/L が小さい時は、ほぼ $f_0 = 1.0$ となるので、特に深いすべりで無いかぎり、常時 f_0 を使う必要は無く、また、地表形状が特に複雑で上に凸な異常な臨界すべり面が生じる恐れが無い限り、凸すべり面規制を使用する必要も無いと思われる。

表 3-2 計算に用いた地盤物性一覧表

ケース		第 1 層	第 2 層	第 3 層
1	r tf/m ³	1.8		
	c tf/m ²	1.0		
	ϕ 度	10.0		
2	r	1.8		
	c	1.0		
	ϕ	10.0		
3	r	1.92		
	c	4.25		
	ϕ	15.0		
4	r	1.92	1.92	1.92
	c	3.0	1.0	30.0
	ϕ	12.0	5.0	40.0
5	r	1.92		
	c	4.25		
	ϕ	15.0		
6	r	1.8		
	c	1.0		
	ϕ	10.0		
7	r	1.92		
	c	2.9		
	ϕ	20.0		
8	r	1.92	1.92	2.0
	c	2.9	0.0	10.0
	ϕ	20.0	10.0	35.0

CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
 YAMAGAMI EXAMPLE-1 FS=1.191

10 ton
 ベクトル値

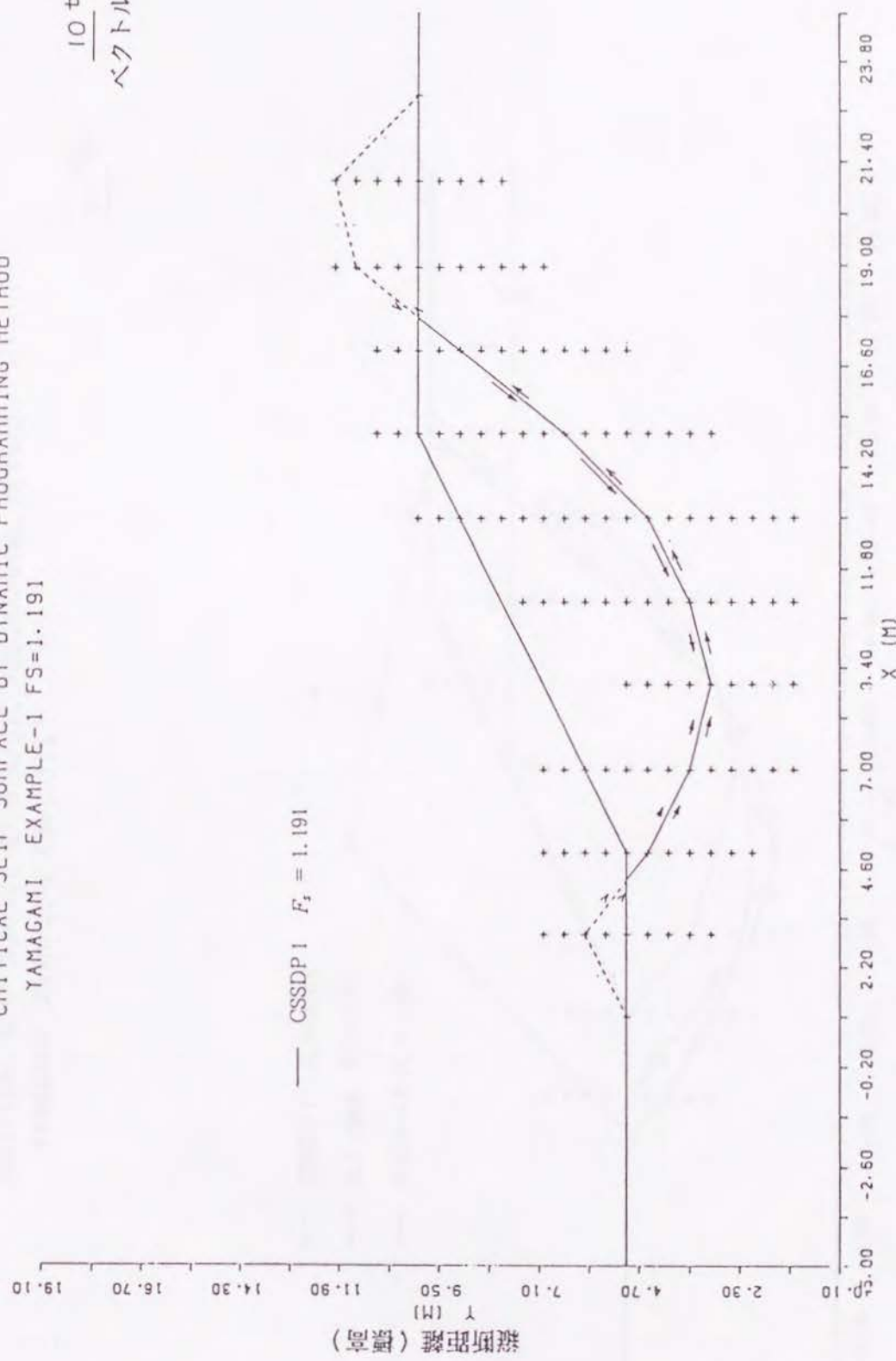


図 3-9 ケース 1.

CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD

YAMAGAMI EXAMPLE-2 FS=1.315

14 ton

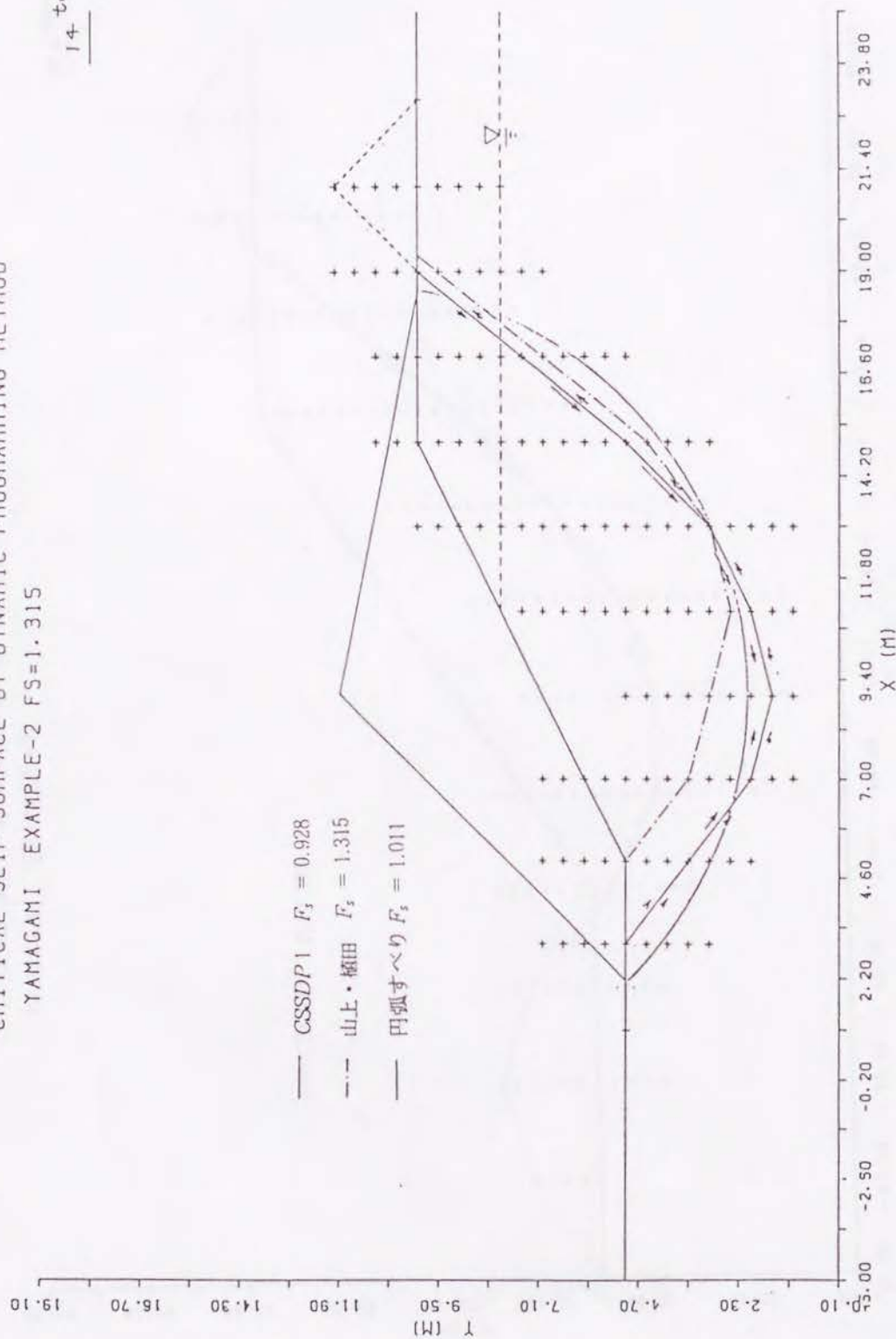


図 3-10 ケース 2.

CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
YAMAGAMI EXAMPLE-3

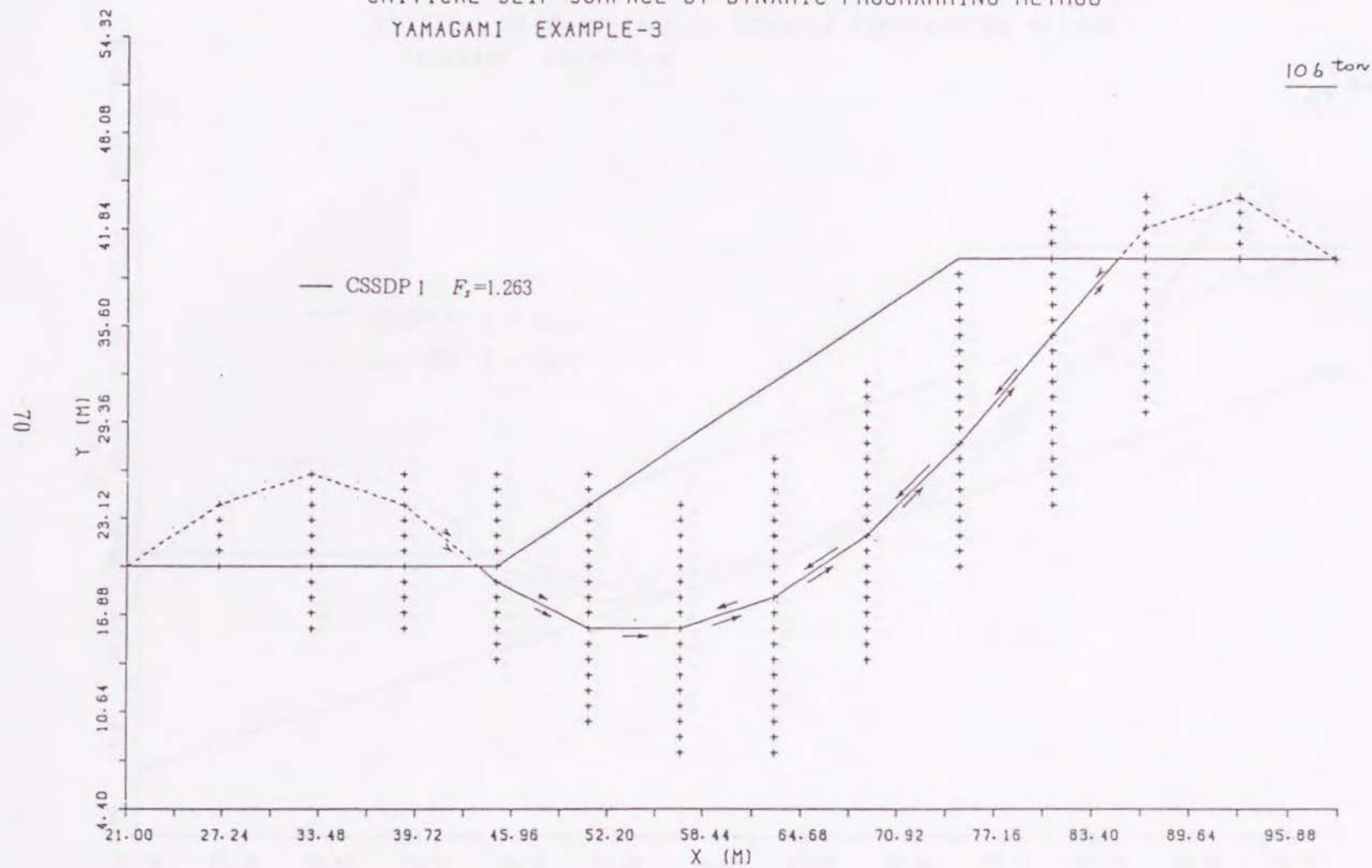


図 3-11 ケース 3.

CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
YAMAGAMI EXAMPLE-4

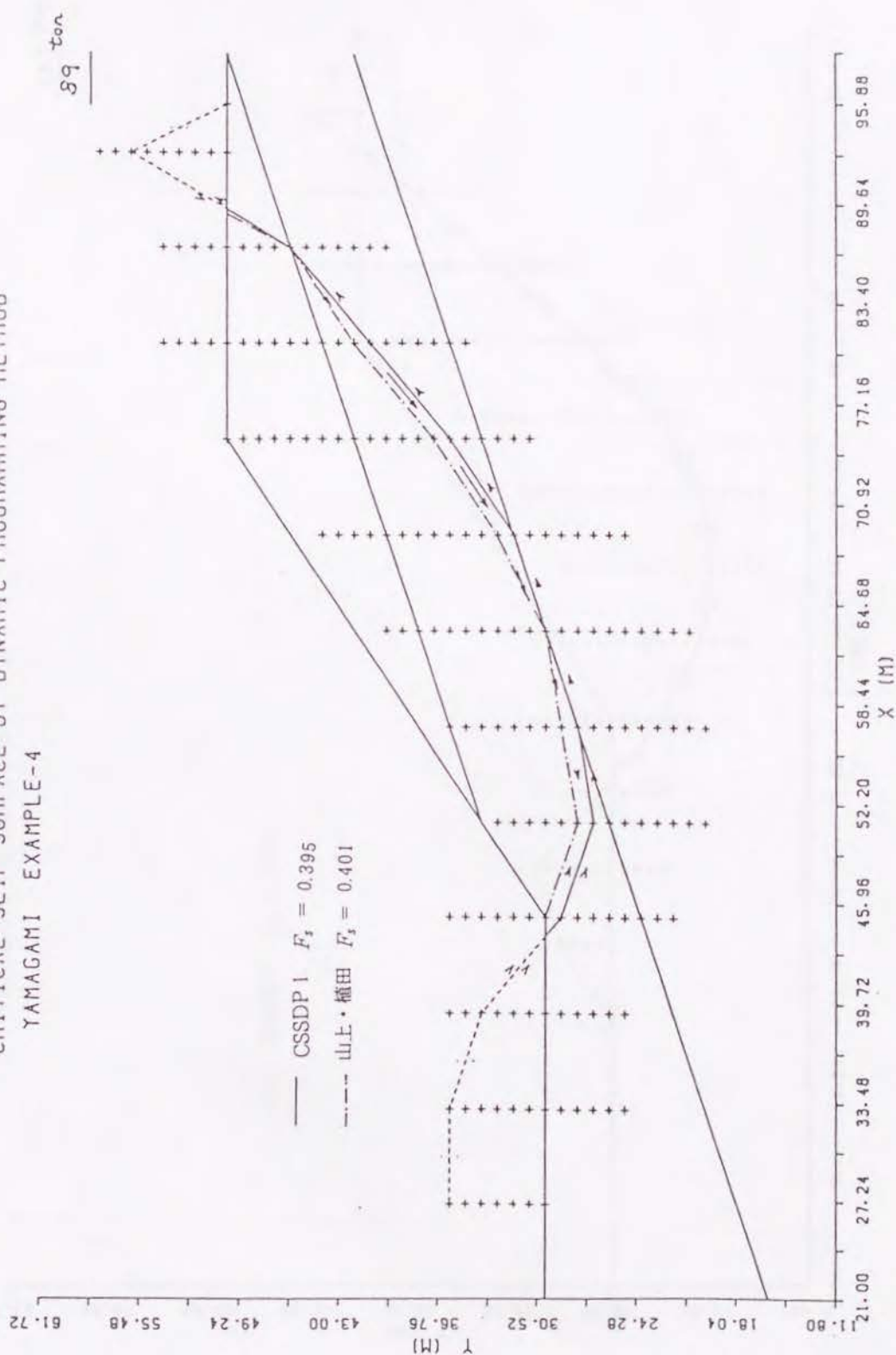


図 3-12 ケース 4.

CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
YAMAGAMI EXAMPLE 5

155 ton

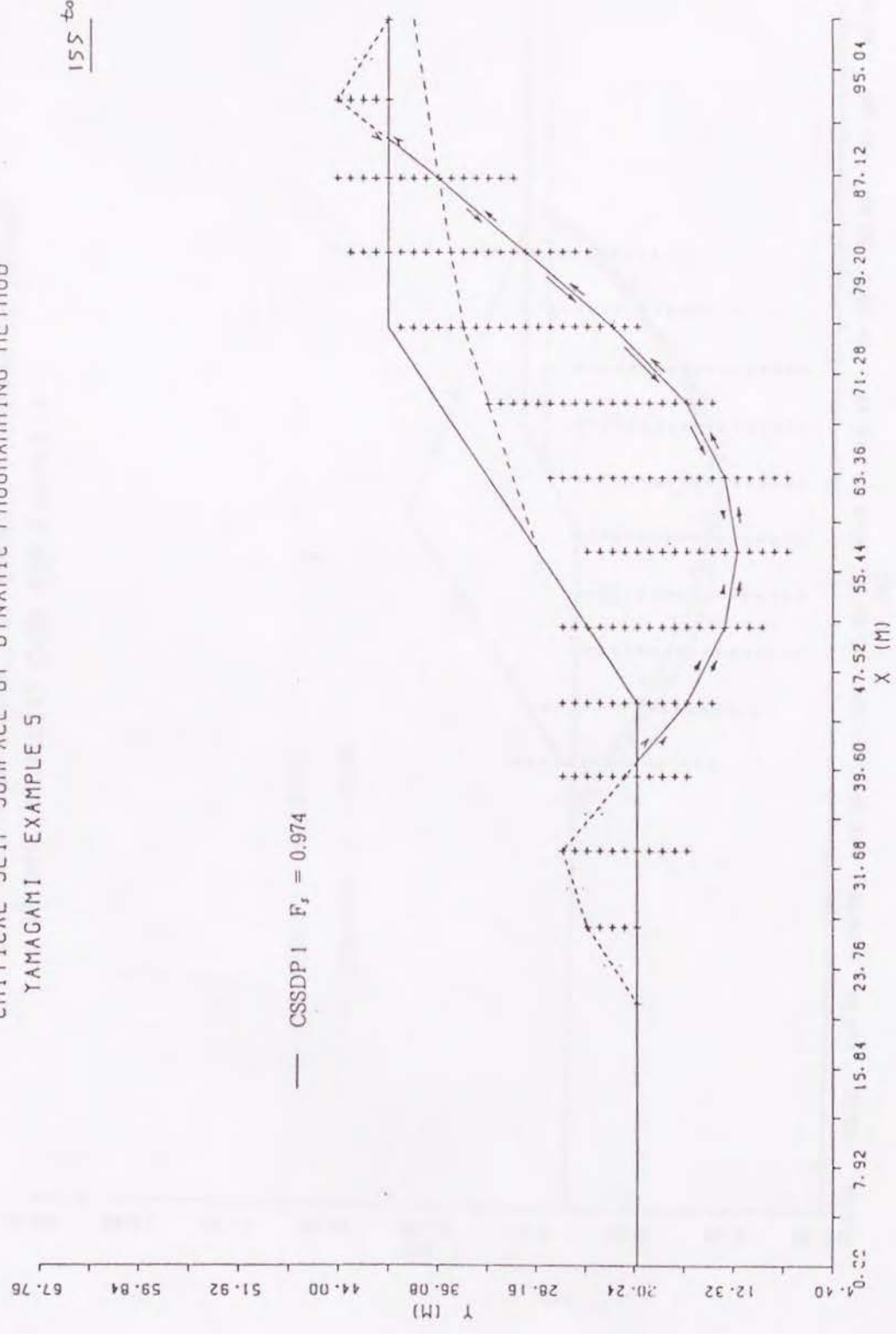


図 3-13 ケース 5.

CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
SEISMIC STABILITY CASE FOR EXAMPLE-2

86 ton

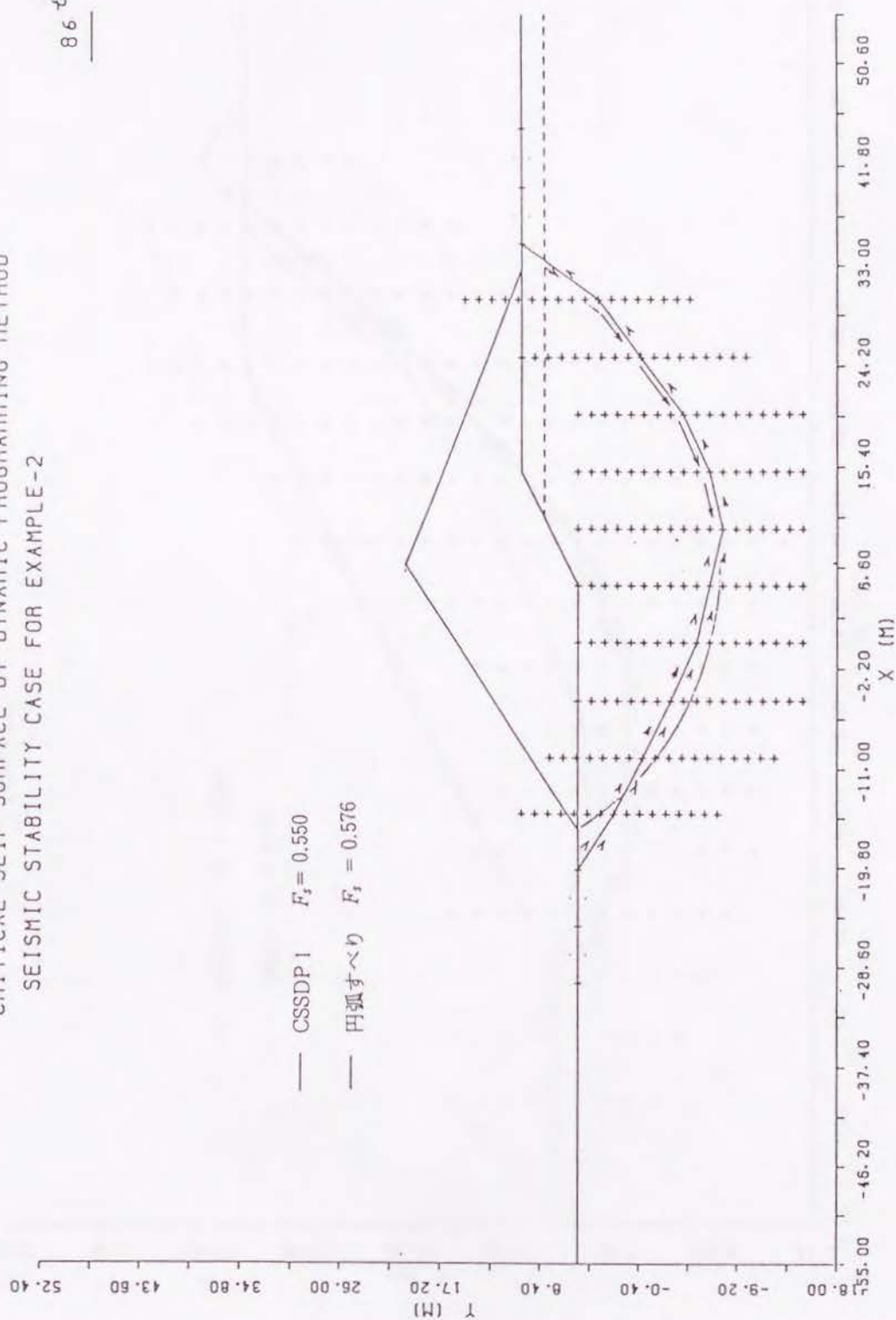
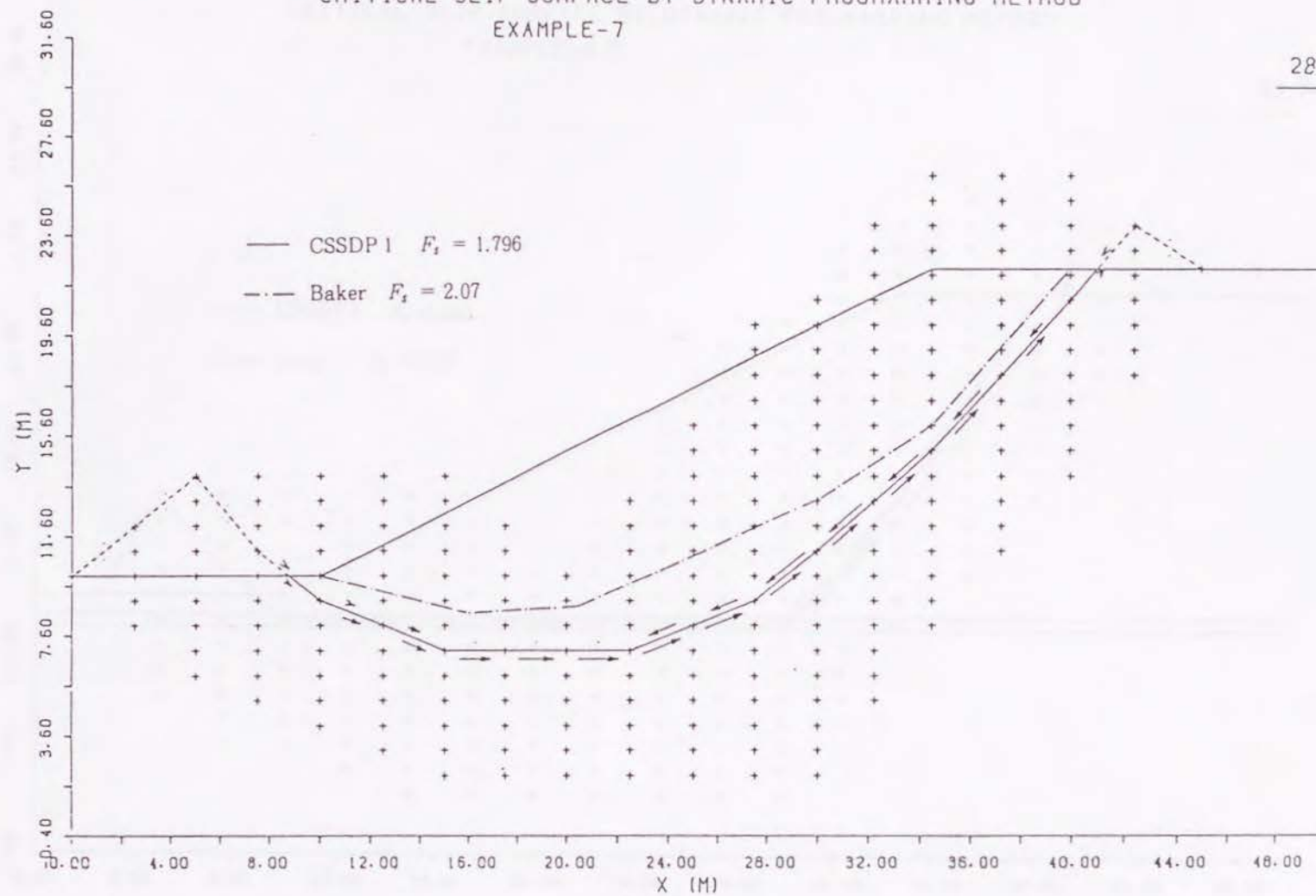


図 3-14 ケース 6.

CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
EXAMPLE-7

28 Ton



☒ 3-15 ケース 7.

CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
EXAMPLE-8

32 ton

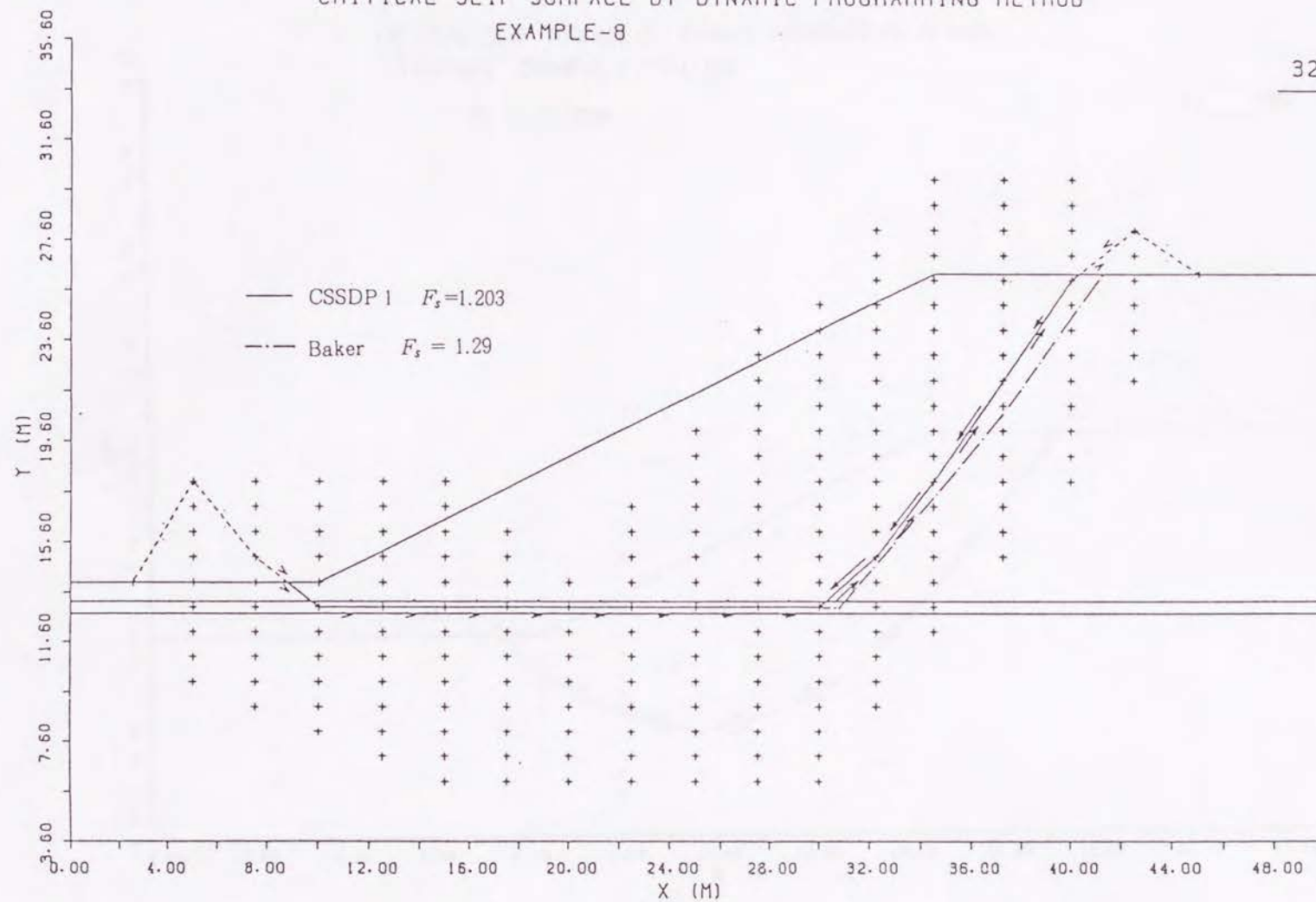


図 3-16 ケース 8.

CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
YAMAGUCHI EXAMPLE-1 FS=1.191

FS = 1.296

11 TON

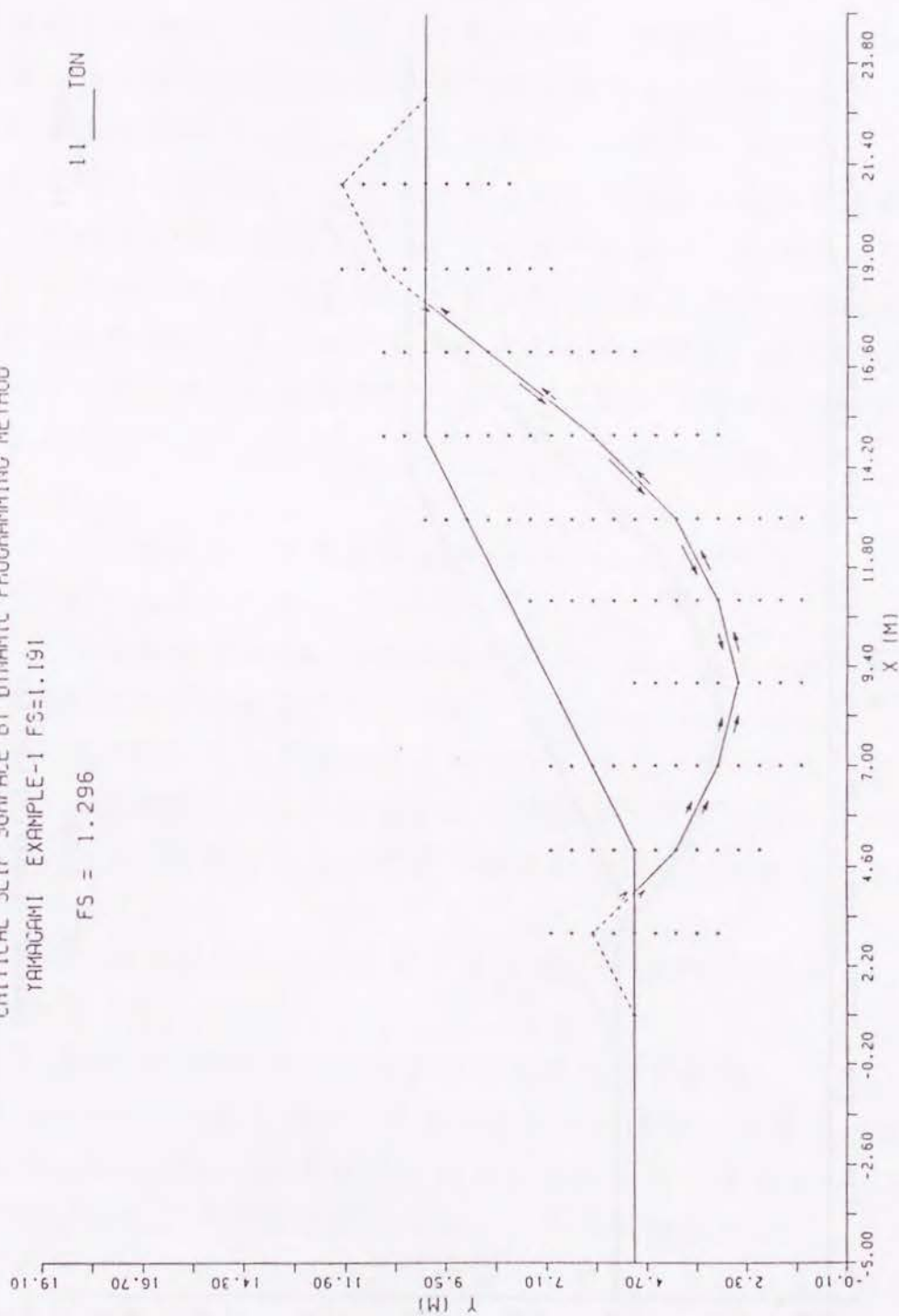


図 3-17 f_0 使用後のケース I

CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD

YAMAGUCHI EXAMPLE-1 FS=1.131

FS = 1.295

11 TON

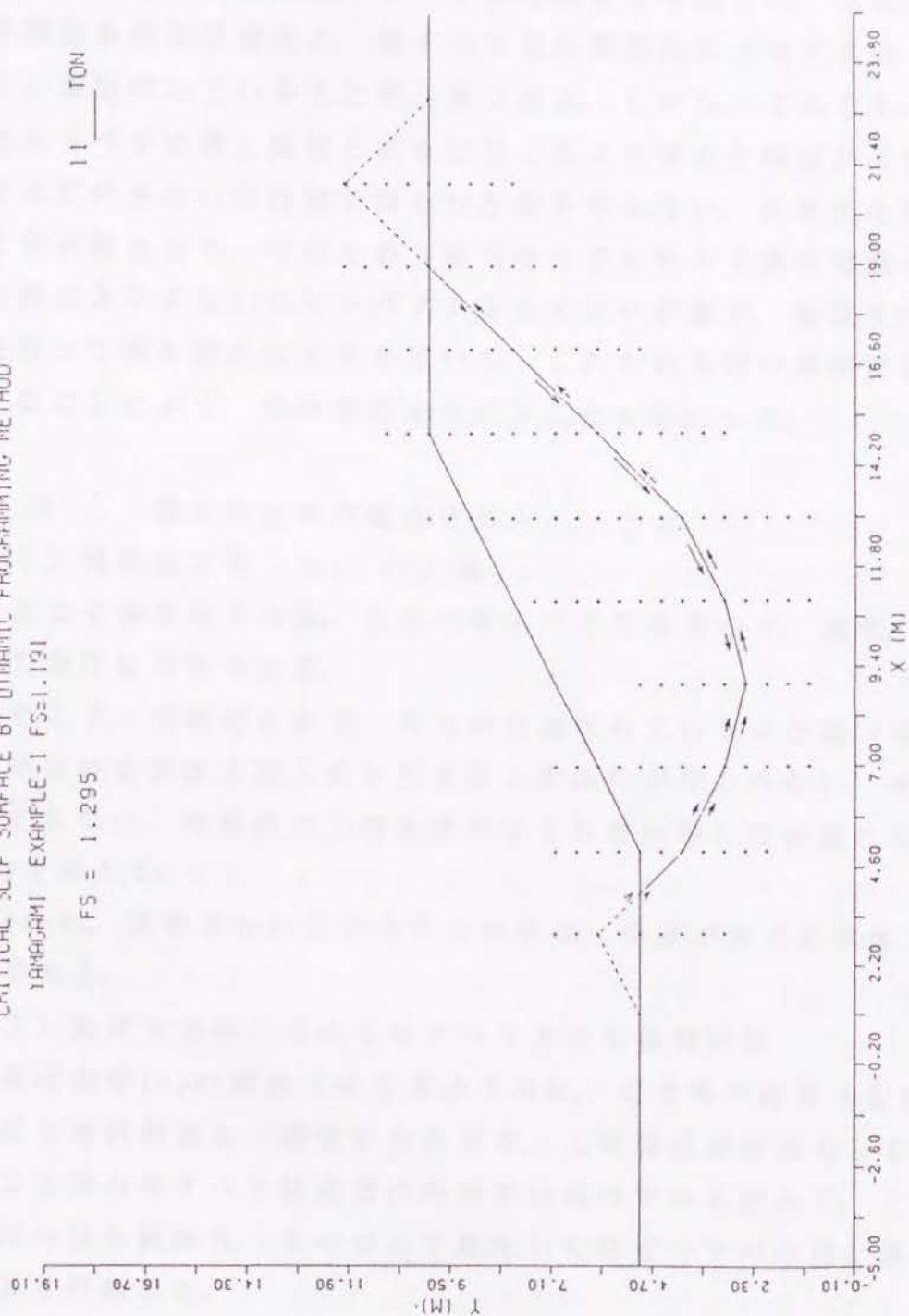


図 3-18 f_0 と凸面規制を使用したケース 1.

3.3 CSSDP による危険箇所抽出法

前節までに述べた臨界すべり面解析法 (CSSDP) を用いて、危険箇所を抽出するためには、すべり面の推定は不要だが、土質条件や、地下構造条件など素因と、地すべり発生誘因条件 (地下水位、地震力など) が判明していることが必要である。しかし、これらを、すべて初生地すべりに対し既知とするには、多大な労力と時間が必要な為、できるだけ少ない情報量で得られた安全率を用い、危険度を判定することが必要となる。そのため、現状の地下水位の上昇や地震力の付加など誘因条件すなわちインパクトを与えない状態で、臨界すべり面解析を行って得た現況安全率を用いて、これをある種の基準安全率と比較することにより、危険度判定を行うことを検討した。

3.3.1 現状安全率の頻度分布

1) 現状安全率 F_{sp} の定義

ここで取り扱うのは、初生の地すべりであるので、通常、その発生外力条件は不明である。

そこで、現状のまま、外力が付加されていない状態 (地下水の上昇がない等間隙水圧上昇を引き起こす条件が付されない、地震力が付加されない、地形の人工的改変がなされない等) の斜面の現状安全率 F_{sp} を考える。

F_{sp} と、通常言われる安全率との差は、後者が外力を考慮している点である。

2) 現状安全率を求める地すべり未発生事例斜面

現状安全率 F_{sp} の頻度分布を求める為に、安全率の計算 (安定解析) を行う事例斜面を、調査が行き届き、土質強度が既知もしくは推定可能な全国の地すべり地周辺の未発生斜面の中から選んだ。この未発生斜面の対象範囲は、その近くで発生した地すべりの方向と規模 (長さ) により判断した。

具体的には、ある地すべり土塊の斜面方向の長さより、当該地すべりに接する地すべり土塊外の、地すべり地外斜面で生じ得る地すべりの長さを推定し、この地すべり地外斜面の縦断面の範囲を決定した後、それを用いて、 F_{sp} の計算を行った。

ここでは、巻末資料2にある50事例中地すべり地外斜面である「外」と記載されたもの39断面について計算を実行した。これらの斜面には、第2章で取り上げたサンプル地区に属さないものもあるが、これは、後述する地すべりに対する基準安全率を求めるのに十分なデータ数を確保するため、種々の発生斜面のうち比較的調査の行き届いた斜面を全国より抽出して事例斜面としたことによる。

3) 現状安全率 F_{sp} の頻度分布

現状安全率を基に危険度を判定する為には、何らかの基準となる安全率 F_c が必要であるので、これを検討する為に、CSSDP を用いて、 F_{sp} の頻度分布を求める。

ただし、 C 、 ϕ 等土質定数は現地調査あるいは土質試験により求められたものを用いた。

まず、計算したデータを整理する際の参考とする目的で、地すべり地に含まれない周辺斜面すなわち未発生斜面の安全率の頻度分布形の特徴を考察してみる。

地すべり未発生および発生斜面の安全率の頻度分布を自然現象に普遍的な正規分布とし、地すべり未発生斜面の安全率の頻度分布について考えると、 F_{sp} が1.0 以下の F_{sp} を持つ斜面は、すでに地すべりを起こし存在しないはずである。つまり、実際に存在している未発生斜面は、地すべりを免れたものであり、図3-19のように全斜面の安全率の頻度分布 (PDF2) の中からすでに地すべりが発生した斜面の頻度分布 (PDF1) の欠けたものが、実際の未発生 (残された) 斜面の頻度分布 (PDF) と考えられる。

この場合、 F_{sp} の分布形を自然現象によく見かけられる対数正規分布と仮定し (図3-19)、計算例39斜面の安全率頻度分布を描いてみた (図3-20)。

この図から、計算例の頻度分布は対数正規分布に極めて近いことが分かる。そのピークは1.0~1.5 (中央値1.25) にある (ただし、 $F_{c2} > 1.0$)。

上述39例の頻度分布形を補足する目的で、香港での調査結果 (R.A. Styles et.al., 1984) との比較を、次に行う。これは簡便ヤンプ法による非円弧すべり解析結果であり、香港島中の50斜面をサンプ

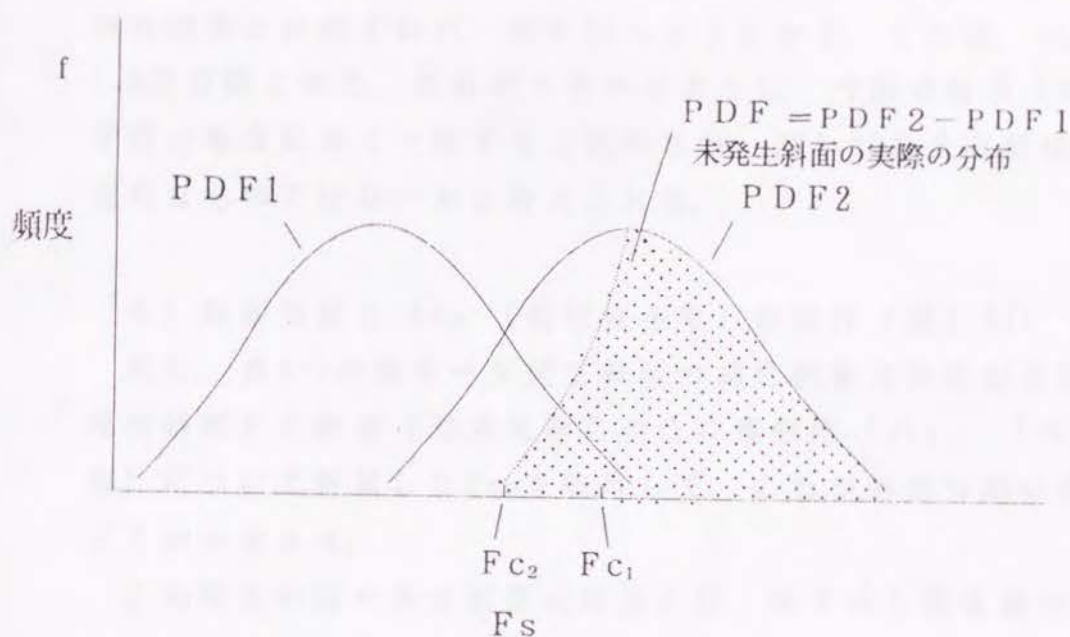


図3-19 F_{sp} の分布説明図

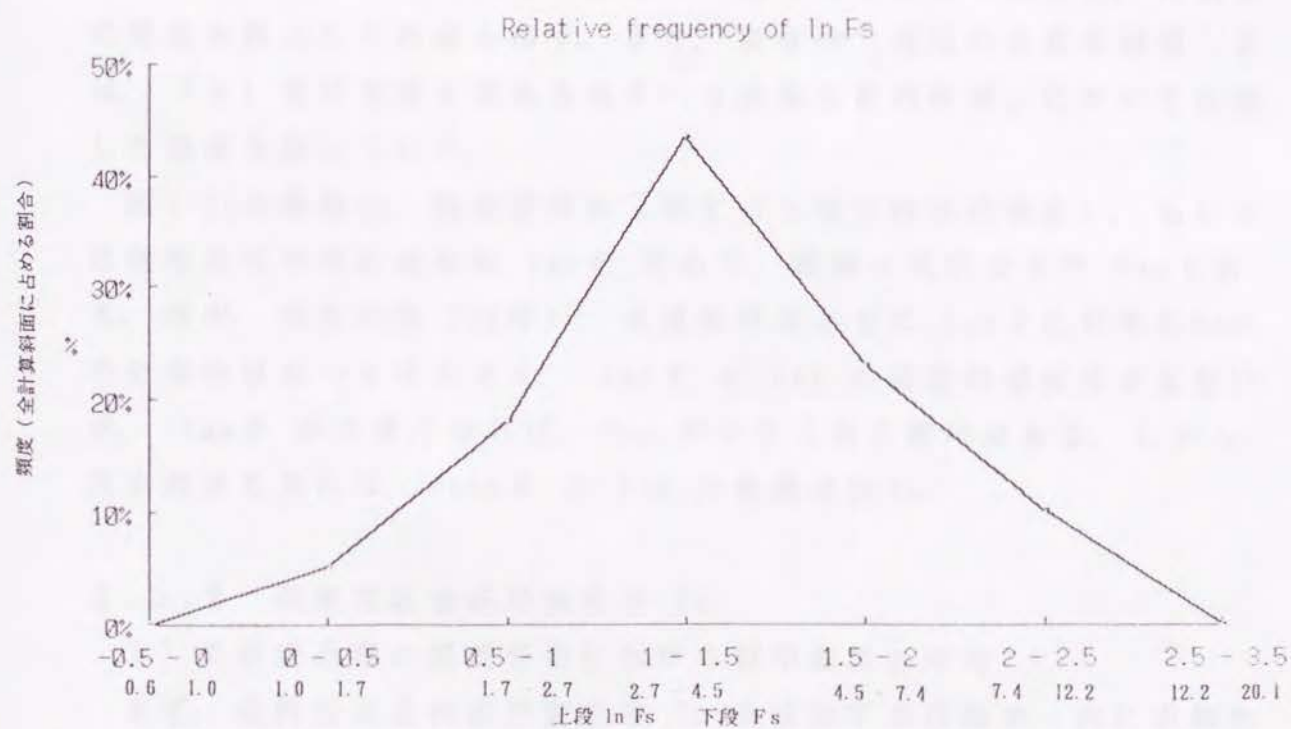


図 3 20 現状安全率の相対頻度分布 (対数グラフ)

ルとし、その安全率の分布を求めたものである。その中で、地すべりの未発生斜面についてのみの頻度分布が求められており、今回の39例の結果と比較すれば、図3-21のようになる。これは、 F_s 頻度分布の1.0近傍図となる。これから分かるように、今回の結果（Kubota）と香港の場合は良く一致すると判断され、図3-20の分布形は、かなり普遍的なものではないかと考えられる。

4) 斜面勾配と F_{sp} （現状安全率）の関係（図3-22）

次に、表4-1の地すべり発生斜面の発生前復元斜面および周辺の未発生斜面50斜面（巻末資料2の50事例中「内」、「外」全ての斜面）について計算した F_{sp} を使用して、これが斜面勾配に依存するかどうかを考える。

この発生斜面の発生前復元斜面とは、地すべり発生前の地形図があるものはそれに基づく地形を指し、発生の時期が古く、発生前の地形図がないものについては、現在の発生後の地形図を基に発生地点周辺の等高線パターンや地質的な連続性、歴史的記述等を勘案し、発生前の地形を復元した斜面を指す。また、後者の「周辺の未発生斜面」とは、「2）現状安全率を求める地すべり未発生事例斜面」において定義した斜面を指している。

図3-22の横軸は、発生前地形（地すべり発生斜面の場合）、もしくは現地形の平均斜面勾配 $\tan \theta$ であり、縦軸は現状安全率 F_{sp} である。図中、発生斜面（口印）、未発生斜面ともに $\tan \theta$ に対する F_{sp} の分布のばらつきは大きく、 $\tan \theta$ と F_{sp} の直接的関係は言えないが、 $\tan \theta$ が大きくなれば、 F_{sp} が小さくなる傾向はある。しかし、発生斜面を見れば、 $\tan \theta$ と F_{sp} の相関は無い。

3.3.2 危険度区分基準安全率 F_c

1) 現状安全率の頻度分布における標準偏差と平均

まず、危険度区分の基準安全率 F_c を検討する目的で、先に求めた現状安全率の頻度分布における標準偏差ならびに平均を考える。

図3-20の分布を前提に統計計算を行うと、標準偏差 $\sigma = 1.65$ 、平均の現状安全率 $F_{sp} = 3.77$ となる。

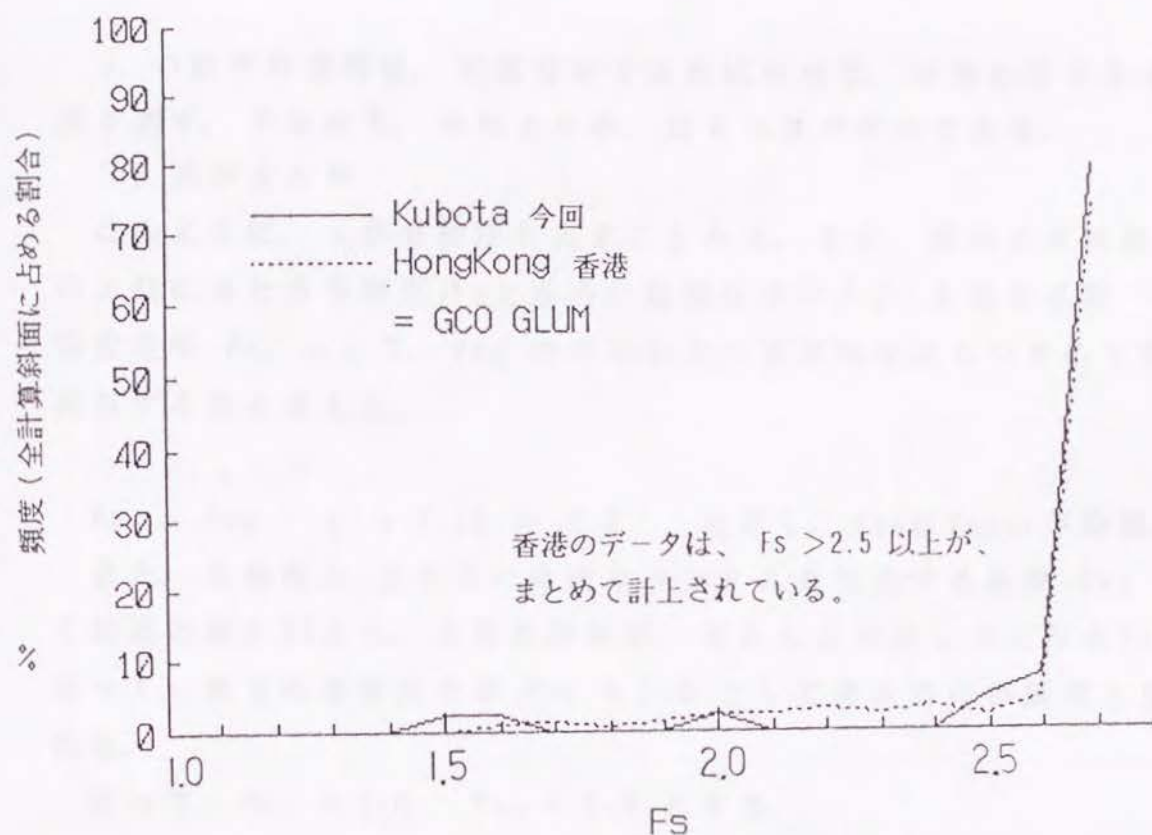


図 3-21 今回の計算結果と香港の分布の比較

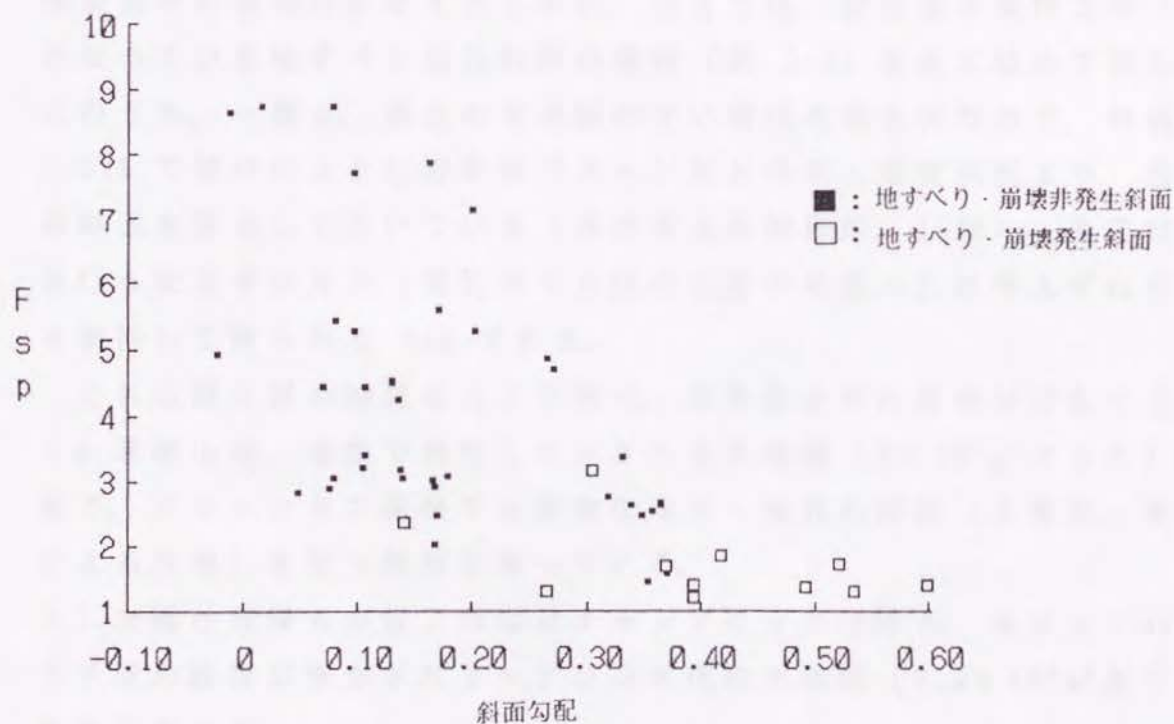


図 3-22 斜面勾配と F_{sp} (現状安全率) の関係

σ の数学的意味は、正規分布であれば明確で、平均に対する分散度を表す。すなわち、平均よりの、ばらつきの平均である。

2) 基準安全率

このように、 σ が分散度を表すことから、まず、前出の危険度 B_3 の上位に当たる危険度 B_2 とさらに危険なランク B_1 を分ける第一の基準安全率 F_{c1} として、 F_{sp} の平均からの標準的なばらつきの下限に相当する次を考える。

$$F_{c1} = F_{sp} - \sigma = 2.12 \div 2.0 \quad \text{ただし、} F_{sp} \text{ は } F_{sp} \text{ の平均値。}$$

また、危険度 B_1 とさらに危険なランク A を判定する基準 F_{c2} として前述の図 3-21 より、未発生斜面が、ほとんど存在しなくなる F_{sp} を採って、第 2 の基準安全率 $F_{c2} = 1.5$ として考えるのが妥当と思われる。

従って、 $F_{c1} = 2.0$ 、 $F_{c2} = 1.5$ とする。

3.3.3 基準安全率に対する事例斜面の当てはめ

本論文で対象としているのは第三紀層の地質境界斜面であるが、基準安全率の意味付けをするために、ここでは、前述巻末資料 2 の「内」となっている地すべり発生斜面の事例（表 3-3）をあてはめて見た。このうち、一部は、過去の地形図のない時代の発生例なので、前節 3.3.1 で述べたように等高線パターンなど地形・地質状況より、発生前斜面を復元して用いている（建設省土木研究所、1988）。あてはめを行う安全率は外力（現況地下水位の上昇や地震力）は考えずに計算を実行して得られる F_{sp} である。

これら発生例の特徴をここで述べ、基準安全率の意味付けをする。

- 1) 葛老山は、地震で発生したとされる大崩壊（ $2 \times 10^7 \text{ m}^3$ クラス）斜面で、グリーンタフ地帯でも危険な地形・地質的特徴（水衝部、断層による分断）を持つ斜面となっている。
- 2) 大礫は成層火山体上の熔岩キャップロックを持ち、キャップロック下層の弱層が浸食されトップリング性の大崩壊（ $7.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ クラス）を生じている。
- 3) 名立は第三紀層のうち高い地すべり発生率を持つ（ $S = 41\%$ ）寺

表 3-3 事例斜面

名 称	誘 因	CSSDP による 計 算 F_s	対 象 斜 面 形
1. 栃木県葛老山	E	2. 2 8	復 元
2. 栃木県 大 薮	E	1. 9 5	"
3. 新潟県 名 立	E	1. 7 4	"
4. 長野県虚空蔵山	E	1. 2 2	"
5. 長野県御岳崩れ	E	1. 2 1	発 生 前
6. 長野県 松 越	E	1. 2 8	"
7. 山梨県七面山	E	1. 6 3	復 元
8. 高知県 怒 田	P	1. 2 9	地 す べ り 中
9. 高知県 八 畝	P	1. 3 1	"
1 0. 長崎県眉山	E, V?	3. 0 8	復 元
1 1. 福島県いわき (久保田ら、1986)	P	1. 1 0	発 生 前、Mor- genstern法

注) E: 地震、P: 降水、V: 火山活動。

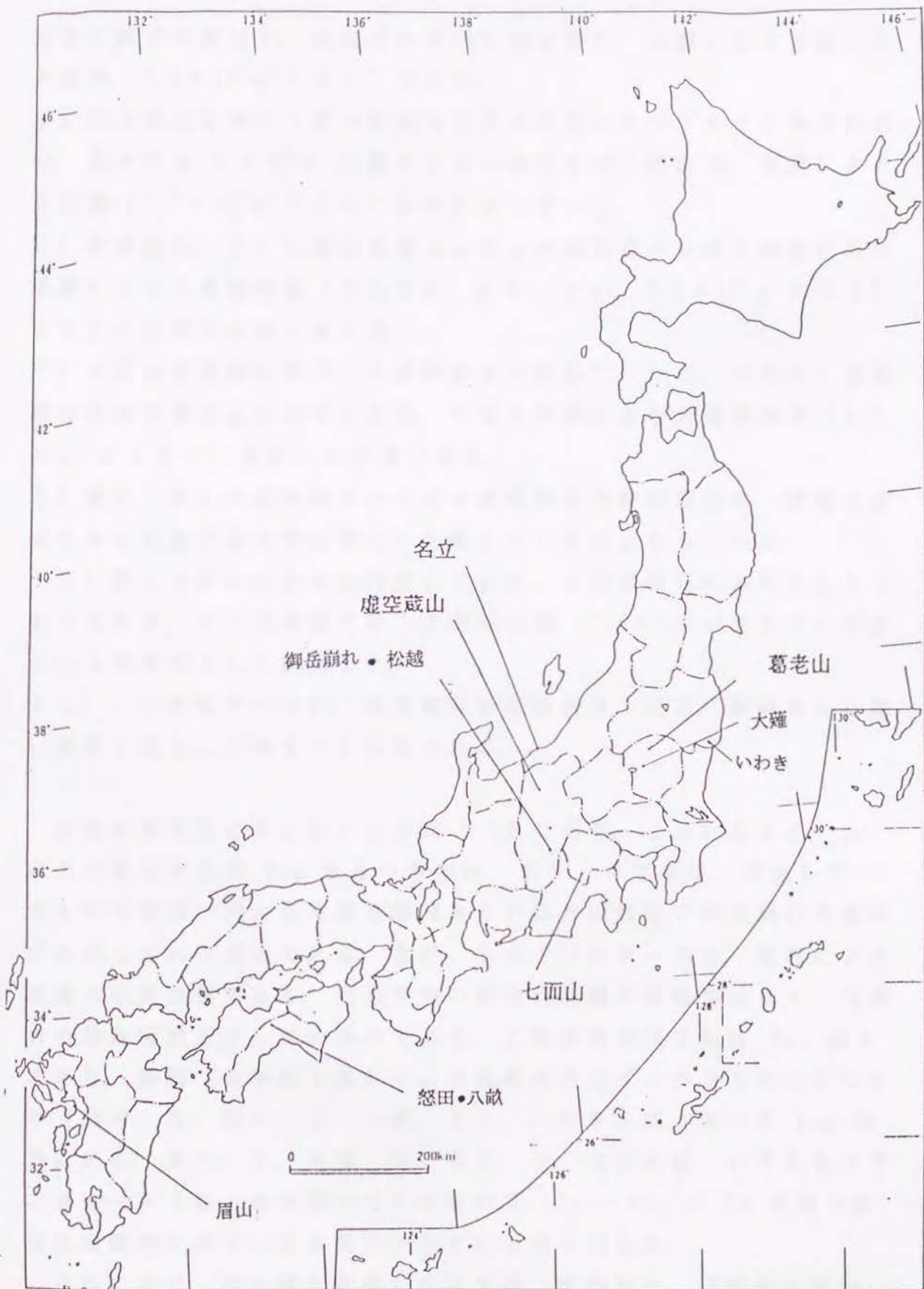


表3-3 付図 計算事例斜面位置図

泊層に属する斜面で、泥岩中にすべり面を持ち、地震により発生した大崩壊 ($9.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ クラス) である。

4) 虚空蔵山は同じく第三紀層の荒倉火砕岩キャップロック境界斜面の、発生率も $S > 80\%$ と極めて高い地質を持つ斜面で、地震による大崩壊 ($1.7 \times 10^7 \text{ m}^3$ クラス) 斜面となっている。

5) 御岳崩れ、6) 松越は成層火山体上の埋積谷から成る斜面に当り、地震により大規模崩壊 (それぞれ、 $3.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、 $2.3 \times 10^5 \text{ m}^3$ クラス) を生じた危険な斜面と言える。

7) 七面山は褶曲山地のうち背斜軸周辺斜面で、かつ、糸魚川・静岡構造線破砕帯周辺斜面でもある、やはり地震により大規模崩壊 ($5.7 \times 10^7 \text{ m}^3$ クラス) を生じた斜面である。

8) 怒田、9) 八畝両地すべりは中央構造線破砕帯周辺の、強度に変成された結晶片岩地帯に発生した地すべり斜面となっている。

10) 眉山は第四紀の火山円頂丘であり、水蒸気爆発により生じた可能性もある、火山性地震に伴う大規模崩壊 ($3.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ クラス) 斜面という特殊例として採用した。

11) いわき地すべりは、棚倉破砕帯花崗岩より成る、破砕された脆い地質に発生した地すべり斜面である。

計算結果を図にまとめたのが図 3-23 である。これによると、 F_{c1} 以上の現況安全率 F_{sp} をもつものは、2 ケースであり、突出しているものは誘因が火山性水蒸気爆発あるいは火山性直下型地震の可能性があるとされる眉山である。また、もう一つのケースは、地震による葛老山の発生例であり、発生当時の歴史的記載が明確ではなく、地震力の推定精度が少し甘いものである。これ以外の発生例は F_{c1} 以下であり、降雨 (地下水上昇) による比較的外力インパクトの小さなもの (図中 8. 怒田、9. 八畝、11. いわき) は、すべて F_{c2} 以下にある。また、2. 大薮、3. 名立、7. 七面山は、いずれもマグニチュード 6 以上の地震で生じたもので、 $F_{c1} \sim F_{c2}$ の F_s を持つ斜面は地震時に地すべりを発生しやすいと考えられる。

これにより、次の様な解釈が成立する。すなわち、基準安全率 F_{c1} は小規模火山水蒸気爆発や巨大地震時の危険斜面と地震による危険斜

面の判別基準となり、基準安全率 F_{c2} は、降水時や地震時他すべての誘因に対する危険斜面と地震による危険斜面の判別基準となるものと意味付けられる。

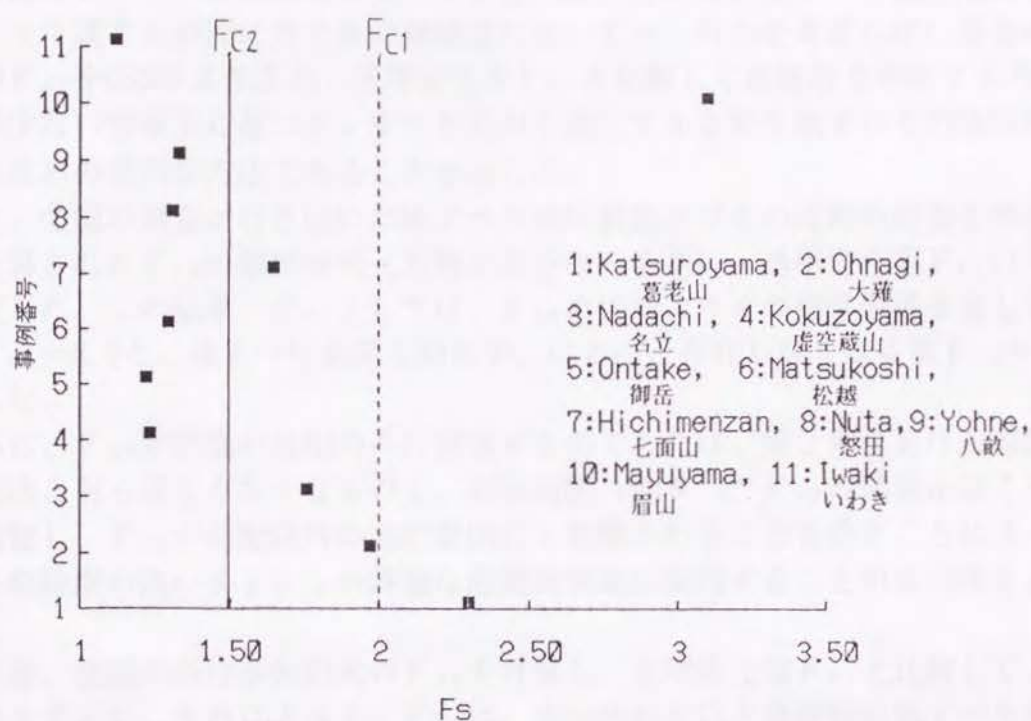


図 3-23 事例解析（基準安全率 F_c と発生例の比較）

3. 4. まとめ

本章では、多層地盤中の最小安全率を持つ任意形状のすべり面を探索し得る臨界すべり面解析法 (CSSDP) について、その動的計画法 (DP) に基づく理論と計算プログラムの概要、ならびに、検証計算について述べ、CSSDPにより求められる安全率の正確さと、その計算時間の妥当性を述べた。同時に、地すべり発生危険度の高いランクに属する斜面に対する詳細調査においては、外力を考慮しない場合の現況安全率 F_{SP} を CSSDP より求め、基準安全率 F_{ci} と比較して危険度を判断する方法が、比較的少ない情報量に基づき、すべり面が不確定である初生地すべりの危険度を判定するための妥当な方法であることを示した。

また、全国の調査が行き届いた地すべり発生斜面及びその近傍の斜面を事例として、計算された F_{SP} の頻度分布 (対数正規分布) を基に、基準安全率 F_{ci} ($i=1, 2$) を決定した。この結果、 F_{ci} としては、 F_{SP} の平均よりその標準偏差を差し引いた値の $F_{c1}=2.0$ と、地すべり未発生斜面が、ほとんど存在しなくなる値 $F_{c2}=1.5$ を採用した。

さらに、 F_{SP} が斜面の勾配のみに関係するのであれば、第2章における勾配による抽出法と何ら異ならなくなるので、斜面勾配 $\tan \theta$ と F_{SP} の関係が強くないことを確認し、 F_{SP} が勾配以外の地形要因にも影響されることを示すことによって、 F_{SP} を危険度の高いメッシュの詳細な危険度判定に利用することの妥当性を述べた。

この後、全国の既往事例斜面の F_{SP} を計算し、基準安全率 F_{ci} と比較して、 F_{ci} の意味を考えた。それによると、 F_{c1} は、火山活動や巨大地震時の地すべり危険斜面と大地震時のそれとの判別基準、 F_{c2} は、大地震の危険斜面と豪雨その他すべての誘因に対するそれとの判別基準となることが分かった。

次章では、以上の結果を用いて、初生地すべり発生危険度の総合判定法について検討する。

4. 総合判定法

4. 1 総合判定法と危険度区分

4. 1. 1 概 説

この章では、これまでの章で述べた、地質・地形要因による危険度判別法と、CSSDPによる手法を組み合わせ、初生地すべりに対する危険度判定法を検討する。

4. 1. 2 危険度判定手順

まず、ここで述べる判定法は、図4-1（図1-1の再掲）のフローのように、地形・地質により危険箇所を抽出し（第2章）、スクリーニングを行う。この図中で S_c は、スクリーニングに際しての初生地すべり基準発生率。第2章で用いた要因別発生率 S_i をここでは、まとめて、 S とし、発生率を表す。 S_c としては第2章より50%とし、地質状況により、当該地区で最高の S を有する地質のものはフロー図4-1に従い、 S_c にかかわらず、CSSDPを使用した精査の必要性を検討する。

次に、抽出した箇所（斜面）に対し、CSSDPを適用して F_s を求める。

4. 1. 3 危険度ランク

危険度のランクは、当研究が地質境界周辺に対応することを考慮し、前章、基準安全率の定義などより、次のようなランク分けをするのが良いと思われる。

$$S \leq S_c$$

ランク C 危険度低

当該地区の S の最高値
を持つ地質のもの及び、
 $S > S_c$ のもの及び、
地質境界部で勾配別発
生率が最大でないもの

" B₃ 危険度中低

$$F_s > F_{c1}$$

" B₂ 危険度中（巨大地震に対して危険）

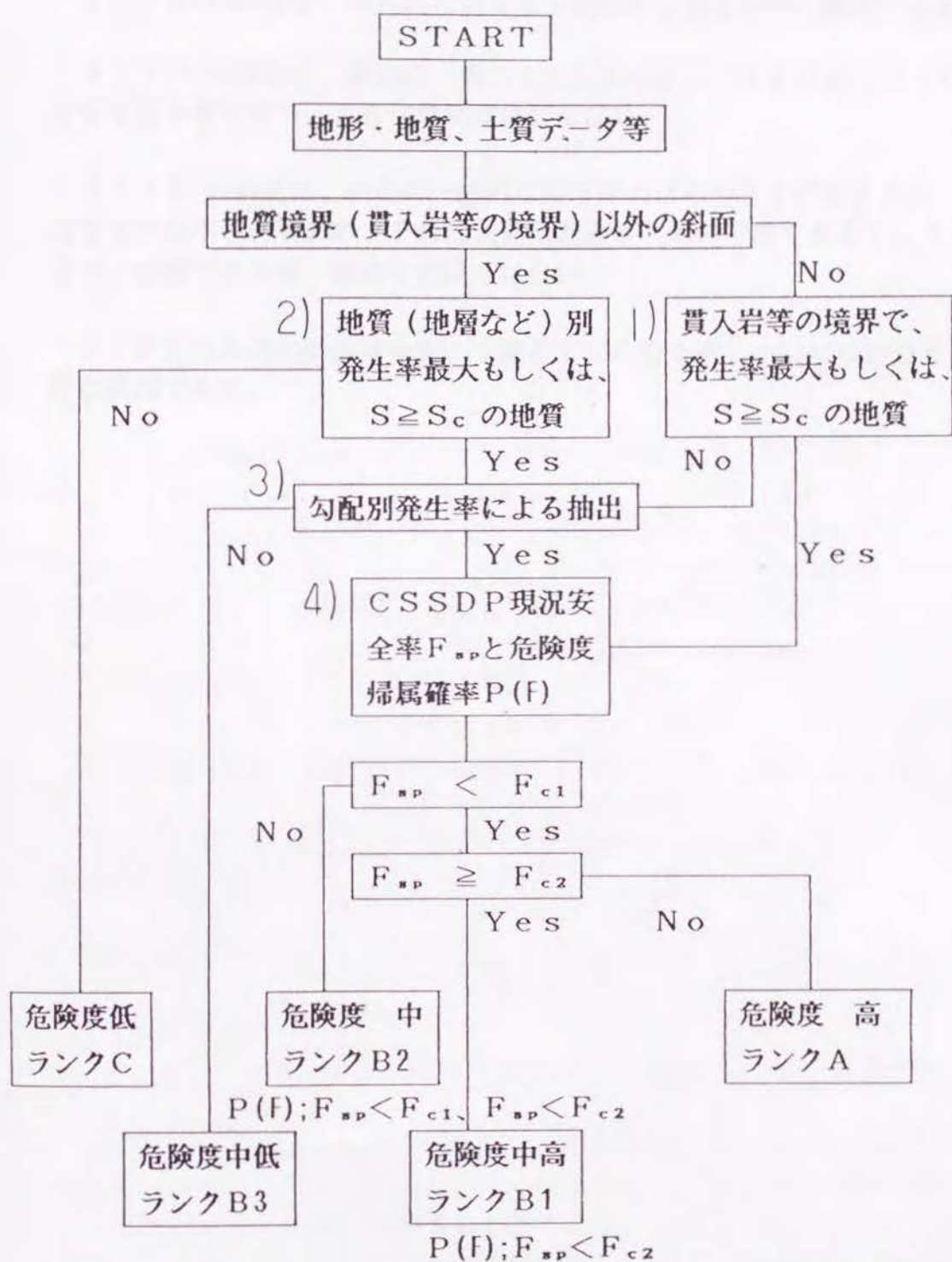
$$F_{c1} \geq F_s > F_{c2}$$

" B₁ 危険度中高（地震に対して危険）

$$F_{c2} \geq F_s$$

" A 危険度高

上記の、各ランクの意味は、次のようである。



ここで、 S : 発生率、 S_c : 基準発生率、 F_{c1} 、 F_{c2} : 基準安全率
 $P(F); F_{sp} < F_{ci} (i=1,2)$: 基準安全率を下回る錯誤の確率。

図 4-1 危険度判定フロー

ランク C の斜面は、地形・地質的に見て危険度の低いもので、精査の必要はない。

ランク B₃ の斜面は、地質的に見て多少危険のあるものの、精査の必要はない。

ランク B₂ の斜面は、斜面の一般的な安全率のばらつきを考慮しても平均よりは大きな安全率を持ち、大きな危険度は持たない。

ランク B₁ の斜面は、斜面の一般的な安全率のばらつきを考慮すると、平均よりは安全率は小さいものの、それは未発生斜面安全率の下限である F_{c2} よりも大きいので、危険であるが 極めて危険ではない。

ランク A は未発生斜面安全率の下限を下回る安全率しか持たないので、極めて危険な斜面である。

4. 2 現状安全率の信頼性と危険度区分の信頼性

4. 2. 1 信頼性解析

一般に、安全率 F_s を計算するに際しては、その時の地下水位や地震力など外力ならびに土質強度の空間的、時間的ばらつきが存在することを念頭に置かねばならないが、外力については、各地点、各時間における値を計算や実測により求めて用いるので、実際上ばらつきのないものとして取り扱える場合が多い。しかし、土質強度については、場所毎に強度が異なる上に、土質試験をどの場所にも実行して確定することは困難である。このことから、地すべりに対する抵抗力を計算するのに必要な土質強度には、その代表値を用いるのが通常であり、この代表値もしくは平均値を用いる信頼性の評価が必要となる。この信頼性を評価する手法は、信頼性解析と呼ばれ、外力や土質強度のばらつき、つまり、滑動力や抵抗力のばらつきを分散や変動係数で表現することにより、計算される F_s の信頼性を評価して行くものである。

ここで、評価すべきものは、土質強度に平均値を用いた計算で $F_s \geq 1$ と判断されたにもかかわらず、 $F_s < 1$ となる確率であり、滑動力を D 、抵抗力を R とすると $F_s = R/D$ となるので、 $R/D < 1$ すなわち $R < D$ なる確率 $\text{Prob}(R/D)$ を求めて評価を行う。この際、 $R < D$ と同義の $R - D < 0$ の確率 $\text{Prob}(R - D < 0)$ を求めるのが信頼性解析のような不等式の真偽を確認する場合の常套手段となっている。

今、 $R - D = t'$ とおくと、 R と D がある値 R_i 、 D_i を取り、ある t' の値 t'_i を生じる確率 $\text{Prob.}(t' = t'_i)$ は、

$$\text{Prob.}(t' = t'_i) \propto \text{Prob.}(R = R_i \cap D = D_i) \quad (4.1)$$

R と D は、一般的に独立な事象と見なせるから (R. V. Whitman, 1984)、確率の法則より $\text{Prob.}(t' = t'_i) \propto \text{Prob.}(R = R_i) \cdot \text{Prob.}(D = D_i)$ (4.2)

もし、 R も D も自然現象に普遍的な正規分布をしているとすると、 $\Gamma(\cdot)$ を正規確率密度関数(PDF)として、

$$\begin{aligned} \Gamma(t' = t'_i) &\propto \Gamma(R = R_i) \cdot \Gamma(D = D_i) = [\exp\{-(t - \bar{R})^2 / 2\sigma_R^2\} / (2\pi\sigma_R)^{1/2}] \\ &\quad \times [\exp\{-(t - \bar{D})^2 / 2\sigma_D^2\} / (2\pi\sigma_D)^{1/2}] \\ &= \exp\{-(t - \bar{R})^2 / 2\sigma_R^2 - (t - \bar{D})^2 / 2\sigma_D^2\} / 2\pi\sigma_R\sigma_D = \text{正規分布型} \end{aligned} \quad (4.3)$$

σ_R 、 σ_D はそれぞれ抵抗力、滑動力の標準偏差、 \bar{R} 、 \bar{D} は、 R 、 D の平均。 t は確率変数。従って、 $\Gamma(t' = t'_i)$ も正規分布型に近い確率分布をすると思われる。

そこで、もし、 $R - D = t'$ が正規分布をする とすれば、図4.2(a)より R が D より、小さいつまり、地すべりが発生する確率は、 $R - D < 0$ となる確率 $\text{Prob}(R - D < 0)$ であり、次式で表わされる。

$$\text{Prob}(R - D < 0) = P(F) = \int_{-\infty}^0 \Gamma(t') dt', \quad t' = R - D \quad (4.4)$$

これを図4.2(a)のように標準化すれば、 $t = \{(R - D) - R - D\} / \{\text{Var}(R - D)\}^{1/2}$ と

して、地すべりが生じる確率 $P(F)$ は、

$$P(F) = \int_{-\beta}^{\beta} \Gamma(t) dt = \int_{-\beta}^{\beta} \Gamma(t) dt \quad (4.5)$$

β は、信頼性解析において、信頼性指数と呼ばれているものであり、

$$-\beta = t(R-D) = -(R-D)/\{\text{Var}(R-D)\}^{1/2} \quad (4.6)$$

$$\beta = (R-D)/\{\text{Var}(R-D)\}^{1/2} \quad (4.7)$$

ここで、 t' は標準化する前の正規確率変数、 t は標準正規確率変数、 $\text{Var}()$ は分散。 R と D は前述のように独立な事象とみなせるから、

$$\overline{R-D} = \overline{R} - \overline{D} \quad \text{かつ}$$

$$\text{Var}(R-D) = \text{Var}(R) + \text{Var}(D) \quad \text{となり、(4.7)式は、次のようになる。}$$

$$\beta = (R-D)/\{\text{Var}(R) + \text{Var}(D)\}^{1/2} \quad (4.8)$$

ここで、 D_g を重力による滑動力、 D_e を外力（地下水圧、地震力）によるものとする、 D_g 、 D_e は独立とみなせるから、ここでは

$$D = D_g + D_e, \quad \text{Var}(D) = \text{Var}(D_g) + \text{Var}(D_e) = \sigma_{D_g}^2 + \sigma_{D_e}^2 \quad (4.9)$$

だから(4.8)式は、

$$\begin{aligned} \beta &= \{\overline{R} - (\overline{D_g} + \overline{D_e})\} / (\sigma_{D_g}^2 + \sigma_{D_e}^2)^{1/2} \\ &= \{\overline{R}/\overline{D_g} - 1 - (\overline{D_e}/\overline{D_g})\} / \{(\sigma_{D_g}^2/\overline{D_g}^2) + (\sigma_{D_e}^2/\overline{D_g}^2) - (\sigma_{D_g}/\overline{D_g})^2 \\ &\quad - (\sigma_{D_e}/\overline{D_g})^2 + 2(\sigma_{D_g}/\overline{D_g})(\sigma_{D_e}/\overline{D_g})\}^{1/2} \end{aligned} \quad (4.10)$$

ここで、 σ_{D_g} 、 σ_{D_e} は、それぞれ重力、外力による滑動力の標準偏差、 $\overline{D_g}$ と $\overline{D_e}$ は D_g と D_e の平均値。

ところが、 F_s を通常の安全率として

$$\overline{F_s} = \overline{R}/\overline{D} = \overline{R}/(\overline{D_g} + \overline{D_e}), \quad \overline{F_{sp}} = \overline{R}/\overline{D_g} \quad \text{であり両者の比より、}$$

$$\overline{D_e}/\overline{D_g} = (\overline{F_{sp}}/\overline{F_s}) - 1 \quad (4.11)$$

結局

$$\beta = \{\overline{F_{sp}} - (\overline{F_{sp}}/\overline{F_s})\} / \{\overline{F_{sp}}^2 V(R)^2 - V(D_g)^2 - (\overline{F_{sp}}/\overline{F_s} - 1)^2 V(D_e)^2\}^{1/2} \quad (4.12)$$

ここに、 $V()$ はそれぞれ変動係数を表す。

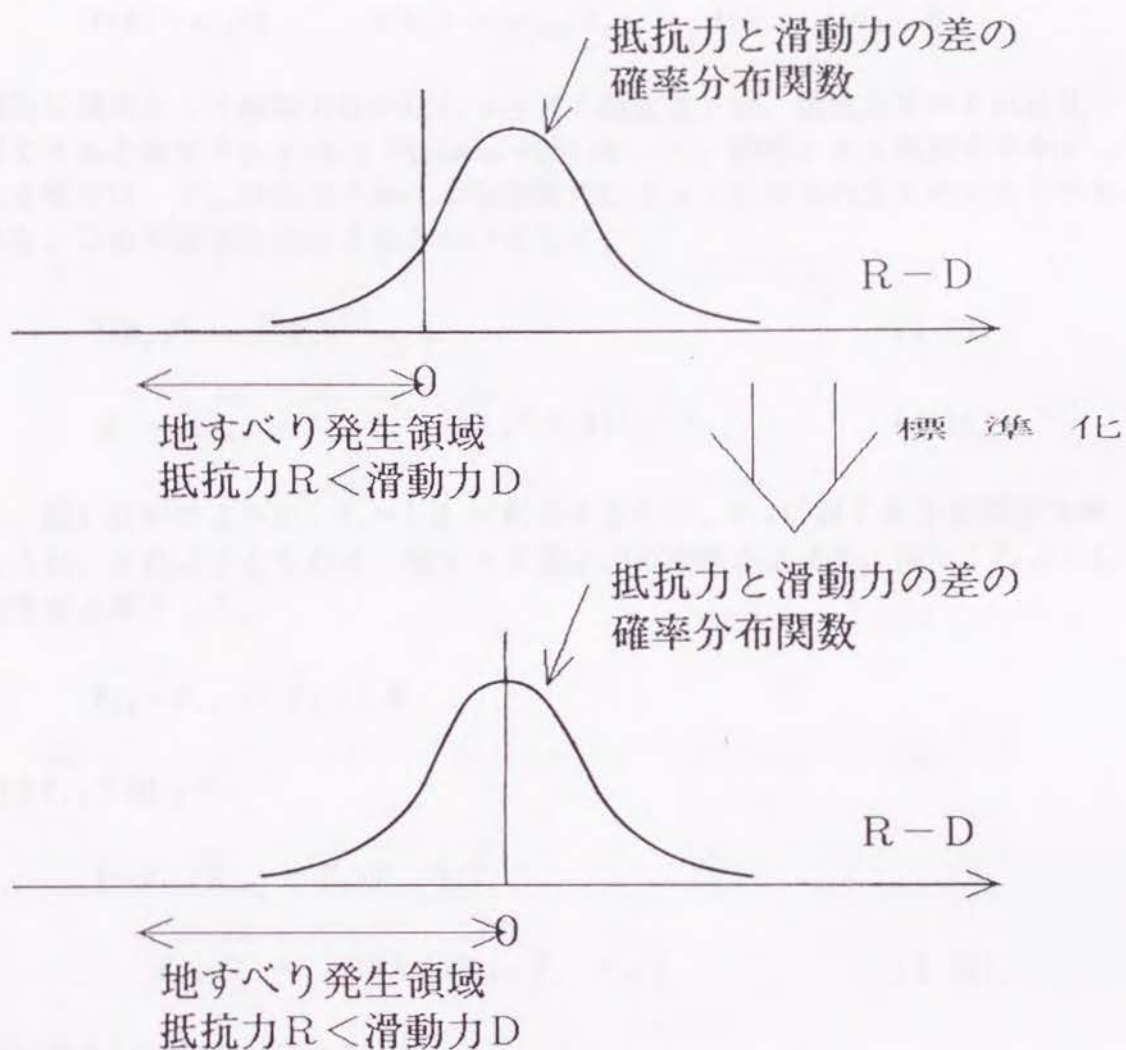


図4-2(a) 抵抗力と滑動力の差の確率分布説明図

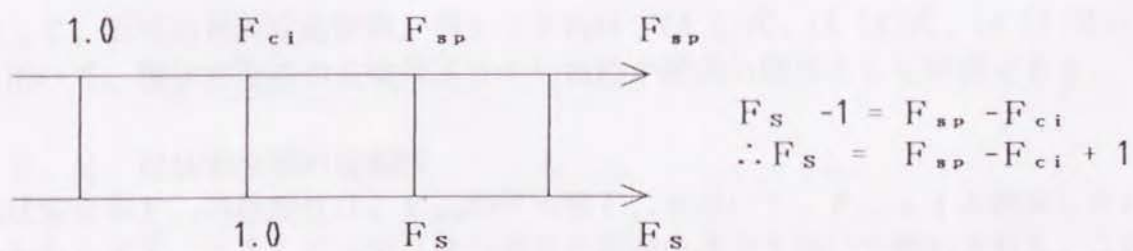


図4-2(b) F_{sp} と F_s の関係説明図

$$V(R) = \sigma_R / \bar{R}、\quad V(D_R) = \sigma_{D_R} / \bar{D}_R、\quad V(D_c) = \sigma_{D_c} / \bar{D}_c$$

一般的な傾向として滑動力Dのばらつき（不確定さ）は、抵抗力Rのそれに比べて無視できると仮定される(R. V. Whitman, 1984)が、今、問題とする現状安全率 F_{sp} を考える場合は、 F_{sp} は重力のみによる滑動力によって計算されるものであるから、なおさら、Dの不確定さはほとんどないとして、

$$V(D_R)^2 = V(D_c)^2 = 0 \quad (4-13)$$

$$\beta = \{\bar{F}_{sp} - (\bar{F}_{sp} / \bar{F}_s)\} / \{\bar{F}_{sp}^2 V(R)^2\}^{1/2} \quad (4-14)$$

さて、図4-2(b)のように、 $\bar{F}_s = 1.0$ に相当するのが、 F_{sp} に対する各基準安全率と考えられ、それ以下となれば、地すべり発生の可能性が高まる。故に、 F_{ci} ($i=1, 2$)を基準安全率として、

$$\bar{F}_{sp} - F_{ci} = \bar{F}_s - 1.0$$

両辺を \bar{F}_{sp} で割って、

$$1 - F_{ci} / \bar{F}_{sp} = \bar{F}_s / \bar{F}_{sp} - 1 / \bar{F}_{sp}$$

$$\therefore \bar{F}_{sp} / \bar{F}_s = 1 / (1 + 1 / \bar{F}_{sp} - F_{ci} / \bar{F}_{sp}) \quad (4-15)$$

(4-15)式を(4-14)式に代入し、

$$\beta = [\bar{F}_{sp} - 1 / (1 + 1 / \bar{F}_{sp} - F_{ci} / \bar{F}_{sp})] / (\bar{F}_{sp}^2 V(R)^2)^{1/2}$$

$$\beta = \bar{F}_{sp} \{1 - 1 / (\bar{F}_{sp} - F_{ci} + 1)\} / \{\bar{F}_{sp}^2 V(R)^2\}^{1/2}$$

$$\therefore \beta = (\bar{F}_{sp} - F_{ci}) / \{(\bar{F}_{sp} - F_{ci} + 1) \cdot V(R)\} \quad (4-16)$$

従って、抵抗力Rの変動係数が推定できれば、(4-5)式、(4-14)式、(4-16)式などを用いて、現状安全率や危険度区分の信頼性が錯誤の確率として評価できる。

4. 2. 2 現状安全率の信頼性

現状安全率 F_{sp} の信頼性は、 F_{sp} の平均値 \bar{F}_{sp} を用いて、 $F_{sp} \geq 1$ と評価したにもかかわらず $F_{sp} < 1$ となってしまう場合の錯誤の確率を用いて表わされる。この錯誤の確率は(4-5)式と(4-14)式より計算できる。しかし、現実の問題として重力のみの滑動力 D_R を使用した安全率である F_{sp} が1以下となる確率を求めて見ても、現存する地すべり非発生斜面は、すべて $F_{sp} \geq 1$ のはずであり、土質強度のばら

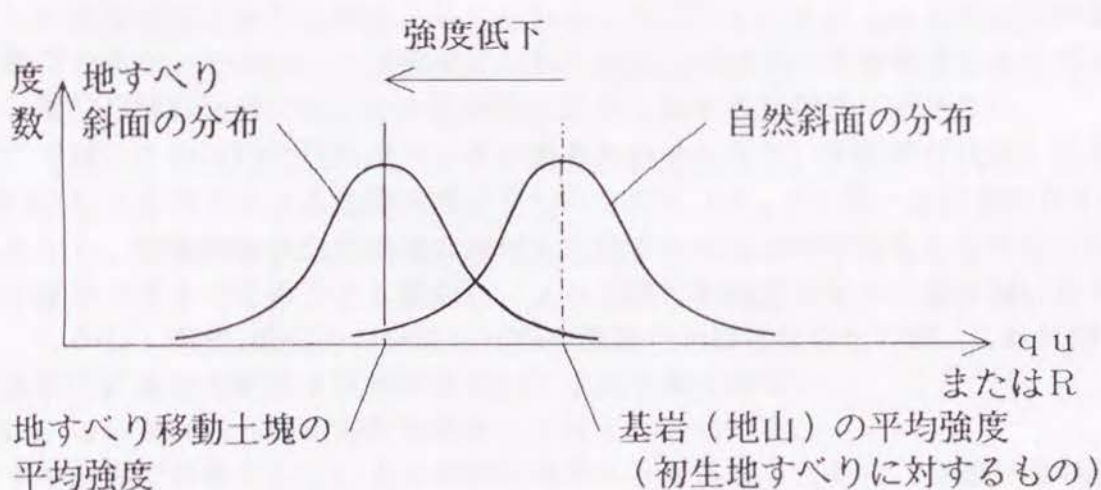


図4-3 地すべり斜面と自然斜面の強度の分布説明図

つきにより $F_{sp} < 1$ となる確率は、斜面現状安全率母集団の性質として計算はできるが、信頼性の検討としては意味をなさない。

従って、図4-2(b)のように $F_{sp} < 1$ を評価の対象とするのではなく、当然1より大きな安全率である $F_{sp} < F_{ci} (i=1, 2)$ に対する評価を行い、 F_{sp} の信頼性とするのが妥当と考えられる。

4. 2. 3 危険度区分の信頼性

ここで取り扱っている危険度区分のうち、危険度ランク $B_i (i=1, 2, 3)$ 以上は平均現状安全率 F_{sp} による区分であるから、これまで述べて来たような F_{sp} のばらつきがある時には、その危険度区分に属する信頼性を把握しておくことが必要と考えられる。

その手段としては、上で述べた F_{sp} の信頼性の評価方法である $F_{sp} < F_{ci} (i=1, 2)$ に対する信頼性の評価が用いられる。この信頼性を評価する為には、前述の通り、 $F_{ci} (i=1, 2)$ は基準安全率であるから、 $F_{sp} < F_{ci}$ に関する錯誤の確率、つまり、 $F_{sp} \geq F_{ci}$ となっているにもかかわらず $F_{sp} < F_{ci}$ となる確率 $P(F)$ を(4-5)式と(4-16)より計算すれば良い。これは平均値 \bar{F}_{sp} が F_{ci} より大きな、ある危険度区分に属

すると、判断できるにもかかわらず、それより危険なランクに属する確率という意味を持つ。

この $P(F)$ を危険度区分の信頼性の指標として危険度ランク B_2 以上に表示し、各危険度ランク内にある信頼性を示すことにより、土質強度のばらつきによる錯誤を配慮した危険度判定がなし得ると考えられる。 F_{ss} の大小そのもので危険度の順位は判断できるが、それは、土質強度すなわち抵抗力のばらつきを考慮しない場合であり、順位自体は示せても、その危険度ランクに属する信頼性は示さない。

ここでは、この $P(F)$ と危険度ランクの組み合わせにより、平均的な代表土質強度を用いてC S S D Pによる危険度判定を行うことにより、「土質・地質条件が不明であるから、安定解析を自然斜面に適用して地すべりなどの予知をしてはならない」と言う従来の考え方を多少とも脱却し、より適確な危険度判定への道が開けたと考える。しかし、当然、抵抗力の分散 $\text{Var}(R)$ を既知とせねばならないが、これは同一地質条件下における既存土質資料を用いて求めざるを得ない。

次に、この $\text{Var}(R)$ の推定方法を検討して行くことにする。

まず本研究で対象としているのが初生地すべりであることから、自然斜面の地すべり未発生斜面における土質特性が分かり、抵抗力 R の分散や平均値が判明していなければならない。ところが、既往の土質試験データは、そのほとんどが地すべり発生斜面に対して求められていると考えて良い。この地すべり発生斜面の土質特性、この場合土質強度のばらつきから地すべり未発生斜面の $V(R)$ を推定する目的で次のような考え方をとる。地すべり発生前の斜面と地すべり斜面（発生後の斜面）は、その平均的土塊強度には差があるのは当然であるが、その平均値に対するばらつきの割合、つまり相対化した散布度を表す変動係数 $V(R)$ は、ほぼ変化しないと考えられる。すなわち、発生前斜面の確率分布は図4-3のように風化したり、破碎されたりした、かなり強度の小さいものから、未風化の強度の大きなものを含み平均値の大きい分、分散も大きい一方、地すべり発生後のものは、強度の小さいものは乱されたすべり面の残留強度程度という下限を持ち、未破壊の大きな強度を持つものが減少してしまうことにより、強度の範囲は限られたものとなり、平均値の小さい分、ばらつきも小さくなると思われる。従って、 $V(R)$ がほぼ同一と仮定する。

この仮定から、既存の地すべり土塊強度データより、初生すべりに対する（発生前の土塊強度の） $V(R)$ を推定できる。

抵抗力の分散を表現するために用いる土質強度としては、臨界すべり面解析中で安定計算として用いられているJamb法の各スライスを念頭において考える必要がある。つまり、抵抗力はスライスの長さ分のせん断強度の和のことであるから、このせん断強度でのばらつきより $V(R)$ が求められる。

しかし、新井地区で計測されていて、統計を取るに足りるデータ数があるのは、一軸圧縮強度なので、これを使用する。この一軸圧縮強度 q_u の定義は、せん断強度とは異なるものではあるが、圧縮強度とせん断強度は密接な関連を持つものであるから、変動係数はこれから求められるものとする。

得られている一軸圧縮強度は、新井地区内の丈ヶ山貫入岩周辺に生じている猿供養寺地すべりに対するもの、および新潟県北部の吉川町北旭平地すべりに対するも

ので、どちらも寺泊・椎谷層の黒岩泥岩に属する地質からなる。又、一軸圧縮試験は、複数の調査ボーリング孔の表層地層から基岩に至るまでの各種深度から得たサンプルについて実施されたものである（中村、1971）。

その結果を表4-1に示す。

データの総度数（サンプル数）は58で、 $\bar{qu} \approx 4.293$ 、標本標準偏差 $\sigma_{qu} = 1.567$ 、変動係数 $V(qu) = \sigma_{qu}/\bar{qu} \approx 0.365$ となる。従って、次式を得る。

$$V(R) \approx V(qu) = 0.365 \quad (4-17)$$

さて、(4-5)式の $P(F)$ を求める際、正規確率表として、対数表などに与えられているものは、

$$\int_{-\beta}^0 \Gamma(t) dt \quad \text{の値であるから、これを } P' \text{ として、}$$

$$\int_{-\infty}^0 \Gamma(t) dt = \int_{-\infty}^{-\beta} \Gamma(t) dt + \int_{-\beta}^0 \Gamma(t) dt \quad (4-18)$$

より

$$\begin{aligned} P(F) &= \int_{-\infty}^{-\beta} \Gamma(t) dt = \int_{-\infty}^0 \Gamma(t) dt - \int_{-\beta}^0 \Gamma(t) dt \\ &= 0.5 - P' \end{aligned} \quad (4-19)$$

この式と正規確率表から求めた P' を用い、 $P(F)$ が計算できる。 $P(F)$ は、前述のようにある危険度ランクに属する確率である。

(4-16)、(4-17)、(4-19)各式を用いて、 $P(F)$ を各基準安全率別かつ F_{sp} 毎に求めると、表4-2となる。

新井地区においては、次節で述べるように危険度区分 B_2 以上のメッシュは、すべて寺泊・椎谷層の黒色泥岩に属するものであるから、ここで計算した $P(F)$ によりその危険度区分に対する評価ができるものと思われる。故に、例えば、新井地区でCSSDPによる平均値 $F_{sp} = 2.5$ が得られた時、ランク B_2 に属するが、 $F_{c1} = 2.0$ 未満となる確率、つまり危険度ランク B_1 以上となる確率は、0.181、 $F_{c2} = 1.5$ 未満、つまり危険度ランク A となる確率は、0.0853となるので、この値を危険度ランクに併記して評価する。

表4-1 寺泊・椎谷層（黒色泥岩）の一軸圧縮強度

q_u (t/m ²)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	計
度 数	1	5	13	15	12	8	2	1	1	58

4. 3 事例のあてはめ

ここまで検討してきた総合判定手法の実効性を確認する目的で、第2章で抽出法検討に使用した事例地区のうち、土質定数等必要なデータが整備されていて、かつ、極めて発生率の高い貫入岩周辺斜面を含む新潟県新井地区を対象に、総合判定法を当てはめて見る。

4. 3. 1 地形・地質因子による抽出

1) 第2章より、新井地区では寺泊・椎谷層（S 41%）が、スクリーニング2で抽出されるとともに、貫入岩（丈ヶ山）周辺斜面もスクリーニング1により抽出され、これらを除いた斜面（メッシュ）は、すべて前節のランク分けでは、ランクCとなる（図 4-1参照）。このことを、メッシュ数の比率で表せば、まず、スクリーニング1より全地区の約 3.8%（64メッシュ）が抽出される。この斜面は寺泊・椎谷層に属するもの60メッシュと西山層4メッシュからなっている。

また、スクリーニング2により寺泊・椎谷層に属する全地区の40.7%（677メッシュ）が抽出されることになる。この両者（60メッシュと677メッシュ）には、抽出されたものに重複がある。しかし、この場合、スクリーニング1で抽出される貫入岩周辺斜面はほとんどすべて寺泊・椎谷層に属するので、ここまでの抽出メッシュ数は、重複文を除いて寺泊・椎谷層677メッシュならびに、西山層4メッシュとなる。

従って、地区全体が1,665のメッシュから成ることを考えれば、上記677メッシュと西山層4メッシュ以外の984メッシュ（地区の約59.1%）がランクC（危険度低）と判定される。

表 4 - 2 基準現況安全率 F_{ci} に対する $P(F)$ 表

F_{sp}	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0
β	0.0	0.249	0.457	0.632	0.783	0.913	1.37	1.64	1.83	1.96	2.13
$P(F_{c2} > F_{sp})$	0.5	0.401	0.323	0.264	0.218	0.181	0.085	0.051	0.034	0.025	0.017

F_{sp}	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.8	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
β	0.0	0.249	0.457	0.632	0.783	0.913	1.03	1.22	1.37	1.64	1.83	1.96	2.05
$P(F_{c1} > F_{sp})$	0.5	0.401	0.323	0.264	0.218	0.181	0.152	0.111	0.085	0.051	0.034	0.025	0.020

2) 同じく、第2章より(図4 1参照)、上記寺泊・椎谷層677メッシュならびに、西山層4メッシュのうち、寺泊・椎谷層の勾配別発生率最大勾配13~14°のメッシュは76、西山層の勾配別発生率最大勾配17~18°のメッシュは0であるので(図2 16)、上記1)で抽出されたメッシュ(677/4 = 681)中、上の76と貫入岩周辺の寺泊・椎谷層60メッシュ以外のものが、ランクB₃(危険度中低)となる。しかし、この貫入岩周辺60中には勾配別発生率最大勾配13~14°のメッシュと重複するものがあるので、この60メッシュから勾配別発生率最大勾配13~14°に属する14を除くと、ここで抽出されるのは、76+60-14=122メッシュとなり、これを1)で抽出された寺泊・椎谷層677メッシュならびに、西山層4メッシュから差し引いた(677/4 - 122=559)メッシュがB₃ランク(危険度中低)と判定される。これは、全地区1,665メッシュの約33.6%に当たる。

3) 上述のように、寺泊・椎谷層勾配別発生率最大勾配13~14°のメッシュ76と貫入岩周辺の60より重複分14を引いた122が次のCSSDPによる危険度判定の対象となる(表 2 1)。

4. 3. 2 CSSDPによる抽出法

ここでは、メッシュの辺長と同じ長さのモデル斜面を設定し、それにより、勾配別の安全率 F_{sp} を計算する。その時に使用する土質定数は、ここでの対象斜面が4メッシュ以外すべて寺泊・椎谷層から成るので、この層に関するものとした。つまり、貫入岩ドームの丈ヶ山に発生している猿供養寺地すべりの試験地において、すべり面より下の基岩である風化泥岩の土質定数が土質試験により得られており、これが、この層に属する斜面における、すべり面を形成し易い風化基岩を代表するものと思われる。得られた定数は、単位体積重量 $\gamma = 1.9 \text{ t/m}^3$ 、粘着力 $C = 2.2 \text{ t/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 28^\circ$ (中村浩之、1971)となっている。

ただし、メッシュ内に安定計算用の測線を考える際、最も F_{sp} の小さくなるものを採用して危険度を判定することが、危険度の信頼性から見て合理的なので、そのメッシュ内で最小安全率を持つ代表測線を選定する方法について、斜面形状を考慮して検討する。この為、斜面形状を代表的なパターンに分けモデル斜面を作成し、どの斜面形状が最も F_{sp} が小さいのかを計算し、比較検討する。

そして、斜面パターン毎の F_{sp} の大小を求めておく。

上記 γ 、 C 、 ϕ 、を基に、モデル斜面(図4 4)にCSSDPを適用して、斜面形ならびに勾配と現況安全率 F_{sp} の関係を求めたものが、図4 5となる。

このモデル斜面は、図4 4に示される代表的な4つの斜面形である複合1型(CX1)、凸型(CV)、凹型(CC)、平面型(F)、複合2型(CX2)を考え、それぞれ単純化し、以下の方程式で表現した。各斜面形を表す方程式は、次のようとなる。

複合1型(CX1)、

$$x = 4(y - L \tan \theta / 2)^3 / (L^2 \tan^3 \theta) + L / 2$$

凸型(CV)、

$$x = y^2 / (L \tan^2 \theta)$$

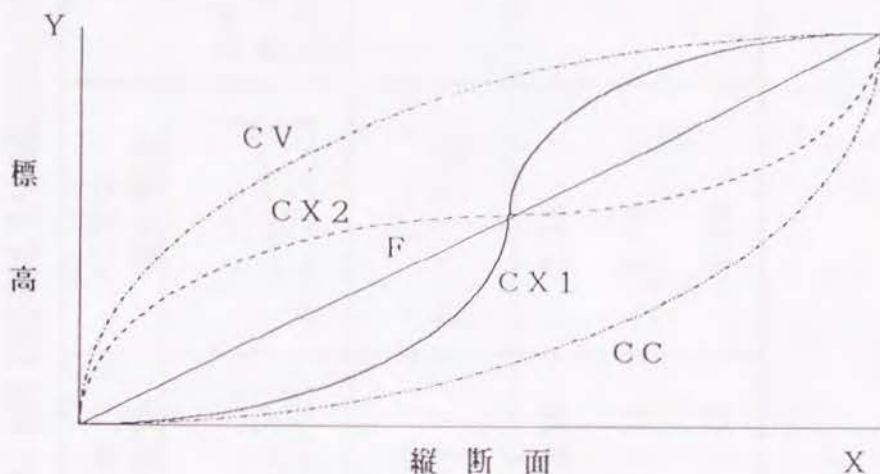


図4-4 斜面形別のモデル斜面
F：平面型 CV：凸型 CC：凹型 CX1：複合1型 CX2：複合2型

凹型 (CC)、

$$y = x^2 \tan \theta / L$$

平面型 (F)、

$$y = x \tan \theta$$

複合2型 (CX2)、

$$y = 4 \tan \theta (x - L/2)^3 / L^2 + L \tan \theta / 2$$






ここで、 x は縦断距離、 y は標高、 $\tan \theta$ は平均斜面勾配、 L は斜面の x 方向長さで、ここではメッシュの長さである250mとした。これを使って、本論文で取り扱う第三紀層地域の代表的な勾配の範囲について、CSSDPにより F_{SP} を求める。

その結果、①もっとも F_{SP} が低くなるのは、どの勾配でも複合1型 (CX1) である。②また、その他の斜面形については、 F_{SP} の小さな順に、凸型 (CV) 斜面、凹型 (CC) 斜面、平面型 (F) 斜面、複合2型 (CX2) 斜面となる。

図4-5には、これらの斜面形状と等高線のパターンの関係も示されている。

従って、ここでは、斜面型別の F_{SP} の大小と等高線パターンを考慮し、各メッシュ内で最小安全率を持つと思われるCSSDP計算測線を定める。その際には、初生地す

図 4-5 勾配別、斜面タイプ別のモデル斜面現状安全率

斜面タイプ		CX1 複合型1	CV 凸型	CC 凹型	F 平面型	CX2 複合型2	備考
縦断型							CV、CCは2次、CX1、2は3次曲線。
等高線のパターン		下部 上部 					
現状安全率	14°	1.55	2.15	2.15	2.50	2.55	
	勾配 θ 22°	1.01	1.29	1.36	1.55	1.59	
	28°	0.677	0.850	1.08	1.18	1.20	

べりが多く発生するとされる峯状斜面（渡、1986）などの地形条件も考慮する必要がある。

計算測線の選出法を整理すると、次のようとなる。

①図4 5を参考に、縮尺1/25,000地形図を用いて、メッシュ内の等高線パターンが F_{sp} のより小さい斜面型となるように選定する。

②同様な斜面型の場合には、峯状の場所を測線に選び、かつ勾配の大きい（等高線密度の大きい）ものを選ぶものとする。

③斜面型の判別がつきにくい場合、つまり、危険度の高い斜面型がメッシュの端部に部分的に見られるものなどについては、上記②の地形条件で選ぶ。

④上記③によっても判別のつかない時には、斜面の最急勾配方向で、かつ、メッシュの中央付近を通るように測線を選ぶ。

⑤この場合、斜面型や勾配などについては、原則として当該メッシュ内の範囲で考える。また、メッシュ斜面下部が河川の水衝部となっている場合や孤立丘の存在等の斜面不安定要因が明瞭な場合は、それを考慮して測線を選ぶ。

座標は、斜面下部を原点として、斜面上方へ向かって取ることとし、CSSDPの探索線（図3 5のstage）は、計算する斜面縦断面と地形図の等高線の交点毎に設定する。

故に、最終的には、表4 3のように、このCSSDPによる抽出法により、危険度 B_2 ランクとされたものが、84メッシュ、 B_1 ランクが24メッシュ、Aランクが14メッシュとなる。

これは、それぞれ、スクリーニング3で抽出された122メッシュの約69%、20%、11%となり、当地区の総メッシュ数1,665に対する割合は、 B_2 ランク約5.1%、 B_1 ランク約1.4%、Aランク約0.8%となる。このスクリーニング3により抽出され、CSSDPに供された122メッシュは、当地区全体の約7.3%に当たり、残りの33.6%が B_3 ランク、59.1がCランクとなることになる。

また、 B_2 ランク以上の危険度のメッシュには、土質強度のばらつきに起因し、該当する危険度ランクより危険度上位のランクに属する確率を表4 3のように計算している。表4 3中、 β_{B1} は B_1 ランクに属する可能性の信頼性指数、 β_A はAランクに属する可能性のそれ、 $P(F)_{B1}$ は B_1 ランクに属する確率、 $P(F)_A$ はAランクに属する確率となっている。また、斜面型の分類は、図4 4による。

表4 3によれば、メッシュ番号16 8（危険度 B_2 ランク）は、 B_1 ランクに属する可能性が上記122メッシュ中最大で、0.488となっている。また、Aランクに属する確率の最も大きいのは、メッシュ番号18 15（ B_1 ランク）で0.464となる。さらに、メッシュ番号16 8は危険度 B_2 と判断されたもののなかで、Aランクに属する確率も最大で0.176となっている。

ここまでに述べたランク分けを平面図に示したものが、図4 6となる。

このように危険度をCSSDPに基づき判断しても、当事例では、より危険度の高いランクに属する確率が4割以上ある場合もあり、留意する必要がある。

表4-3 計算された F_{SP} ならびに、 $P(F)_{B1}$ 、 $P(F)_a$

No.	メッシュ	F_{SP}	危険度	β_{B1}	β_a	$P(F)_{B1}$	$P(F)_a$	斜面形	備考
1	2-3	2.03	B_2	0.720	0.946	0.236	0.171	CV	
2	4-5	1.40	A	—	—	—	—	CV	
3	5-3	3.02	B_2	1.38	1.65	0.084	0.049	CC	
4	6-3	1.19	A	—	—	—	—	CC	
5	7-16	1.76	B_1	—	0.569	—	0.284	CX1	
6	9-20	3.03	B_2	1.39	1.66	0.082	0.048	F	
7	9-22	2.25	B_2	0.546	1.17	0.291	0.121	CX1	
8	9-23	1.63	B_1	—	0.319	—	0.374	CX1	
9	9-25	1.78	B_1	—	0.596	—	0.274	F	
10	10-25	1.97	B_1	—	0.873	—	0.192	CC	
11	11-10	1.38	A	—	—	—	—	CX1	
12	11-13	2.21	B_2	0.475	1.14	0.316	0.127	CV	
13	11-26	1.34	A	—	—	—	—	CX1	
14	12-8	1.81	B_1	—	0.644	—	0.261	CC	
15	12-12	3.09	B_2	1.43	1.68	0.076	0.046	CX1	
16	12-20	2.73	B_2	1.16	1.51	0.123	0.065	F	
17	12-23	3.40	B_2	1.60	1.79	0.055	0.037	F	
18	13-13	1.75	B_1	—	0.548	—	0.291	CX1	
19	13-22	1.87	B_1	—	0.740	—	0.230	F	
20	14-13	2.11	B_2	0.272	1.04	0.394	0.149	CC	
21	14-14	1.49	A	—	—	—	—	CC	
22	14-24	2.66	B_2	1.09	1.47	0.138	0.071	CX2	
23	15-6	1.38	A	—	—	—	—	CX1	
24	15-22	2.08	B_2	0.201	1.00	0.421	0.159	CX1	
25	16-3	2.45	B_2	0.848	1.33	0.198	0.092	F	
26	16-5	3.02	B_2	1.38	1.65	0.084	0.049	CX1	
27	16-8	2.01	B_2	0.0271	0.925	0.488	0.176	CX1	

28	16-23	1.89	B ₁	—	0.769	—	0.221	CX 1
29	17-3	3.17	B ₂	1.48	1.71	0.069	0.044	CV
30	17-5	2.10	B ₂	0.249	1.03	0.401	0.151	CC
31	17-6	2.20	B ₂	0.457	1.13	0.323	0.128	CX 1
32	17-7	2.89	B ₂	1.29	1.59	0.098	0.056	CX 1
33	17-10	4.18	B ₂	1.88	2.00	0.030	0.023	CC
34	17-22	1.67	B ₁	—	0.398	—	0.345	CV
35	17-23	3.00	B ₂	1.37	1.64	0.085	0.050	CV
36	17-39	2.35	B ₂	0.716	1.26	0.236	0.104	CV
37	18-6	3.11	B ₂	1.44	1.69	0.075	0.045	F
38	18-9	2.53	B ₂	0.954	1.39	0.171	0.082	F
39	18-15	1.53	B ₁	—	0.085	—	0.464	CX 1
40	18-22	3.29	B ₂	1.54	1.76	0.062	0.039	CC
41	18-23	1.85	B ₁	—	0.716	—	0.236	CX 1
42	18-25	2.18	B ₂	0.424	1.11	0.337	0.133	CV
43	18-28	2.84	B ₂	1.25	1.57	0.106	0.058	CX 1
44	19-1	2.64	B ₂	1.07	1.46	0.142	0.072	CX 1
45	19-9	2.04	B ₂	0.113	0.964	0.128	0.168	CX 1
46	19-17	2.31	B ₂	0.650	1.23	0.258	0.109	CX 1
47	19-19	3.38	B ₂	1.59	1.79	0.056	0.037	CX 2
48	20-4	4.35	B ₂	1.92	2.03	0.027	0.021	CX 2
49	20-5	3.52	B ₂	1.65	1.83	0.049	0.034	CX 2
50	20-6	3.53	B ₂	1.66	1.84	0.048	0.033	CX 2
51	20-7	4.61	B ₂	1.98	2.07	0.024	0.019	F
52	20-8	2.34	B ₂	0.695	1.25	0.242	0.106	CC
53	20-9	1.88	B ₁	—	0.759	—	0.224	CX 1
54	20-10	3.16	B ₂	1.47	1.71	0.071	0.044	F
55	20-11	3.90	B ₂	1.80	1.93	0.036	0.027	CC
56	20-12	3.62	B ₂	1.69	1.86	0.045	0.031	CX 1
57	20-17	5.65	B ₂	2.15	2.21	0.016	0.013	CC

58	21-2	3.73	B ₂	1.74	1.89	0.041	0.029	CC
59	21-4	3.41	B ₂	1.60	1.80	0.055	0.036	CX 1
60	21-5	1.60	B ₁	—	0.249	—	0.401	CX 1
61	21-6	3.02	B ₂	1.38	1.65	0.084	0.050	CX 1
62	21-7	3.13	B ₂	1.45	1.70	0.073	0.045	CX 1
63	21-8	2.28	B ₂	0.604	1.20	0.274	0.115	CX 2
64	21-9	2.22	B ₂	0.498	1.15	0.308	0.125	CX 1
65	21-10	1.91	B ₁	—	0.793	—	0.215	CC
66	21-11	3.61	B ₂	1.69	1.86	0.045	0.031	CX 2
67	21-12	1.84	B ₁	—	0.691	—	0.245	CV
68	21-20	1.98	B ₁	—	0.884	—	0.189	CX 1
69	21-25	1.74	B ₁	—	0.528	—	0.298	CX 2
70	22-1	3.59	B ₂	1.68	1.85	0.046	0.032	CV
71	22-4	2.48	B ₂	0.884	1.35	0.189	0.088	F
72	22-5	2.09	B ₂	0.217	1.01	0.413	0.156	CV
73	22-6	1.74	B ₁	—	0.523	—	0.301	CX 1
74	22-7	1.50	A	—	—	—	—	CC
75	22-8	1.22	A	—	—	—	—	CX 1
76	22-9	1.64	B ₁	—	0.326	—	0.371	CC
77	22-10	2.30	B ₂	0.631	1.22	0.264	0.111	CX 1
78	22-11	2.73	B ₂	1.16	1.51	0.123	0.065	CX 1
79	22-12	2.37	B ₂	0.733	1.27	0.233	0.102	CC
80	22-13	3.12	B ₂	1.45	1.70	0.073	0.045	CX 1
81	22-20	2.67	B ₂	1.10	1.48	0.136	0.069	CC
82	23-4	3.50	B ₂	1.65	1.83	0.049	0.034	CV
83	23-5	5.19	B ₂	2.09	2.16	0.018	0.015	CX 2
84	23-6	1.21	A	—	—	—	—	CC
85	23-10	2.71	B ₂	1.14	1.50	0.127	0.067	CX 2
86	23-11	3.97	B ₂	1.82	1.95	0.034	0.026	F
87	23-12	4.28	B ₂	1.90	2.01	0.029	0.022	CV

88	23-13	2.43	B ₂	0.824	1.32	0.206	0.093	C X 1
89	23-17	4.23	B ₂	1.89	2.01	0.029	0.022	C V
90	23-21	3.20	B ₂	1.49	1.73	0.068	0.042	C X 2
91	24-4	2.47	B ₂	0.876	1.35	0.189	0.088	C X 1
92	24-5	3.06	B ₂	1.41	1.67	0.079	0.047	C V
93	24-6	2.11	B ₂	0.265	1.03	0.394	0.151	C C
94	24-9	2.03	B ₂	0.082	0.950	0.468	0.171	C X 1
95	24-10	1.94	B ₁	—	0.838	—	0.200	F
96	24-11	2.99	B ₂	1.36	1.64	0.087	0.050	C X 1
97	24-12	2.89	B ₂	1.29	1.59	0.098	0.056	F
98	24-17	1.61	B ₁	—	0.272	—	0.394	C X 1
99	25-1	1.66	B ₁	—	0.372	—	0.356	C X 1
100	25-4	3.11	B ₂	1.44	1.69	0.075	0.045	F
101	25-5	5.50	B ₂	2.13	2.19	0.017	0.014	C V
102	25-6	2.44	B ₂	0.834	1.33	0.203	0.092	C X 2
103	25-7	1.52	B ₁	—	0.537	—	0.295	C X 1
104	25-8	2.59	B ₂	1.01	1.43	0.156	0.076	C X 1
105	25-9	1.36	A	—	—	—	—	C X 1
106	25-10	1.02	A	—	—	—	—	C X 1
107	25-11	1.49	A	—	—	—	—	C C
108	25-12	1.25	A	—	—	—	—	C C
109	26-2	2.89	B ₂	1.29	1.59	0.098	0.056	C X 2
110	26-4	2.55	B ₂	0.976	1.41	0.163	0.079	C V
111	26-5	4.59	B ₂	1.98	2.07	0.024	0.019	C V
112	26-6	2.63	B ₂	1.06	1.46	0.145	0.072	C X 1
113	26-7	2.31	B ₂	0.652	1.23	0.258	0.109	C X 1
114	26-8	1.47	A	—	—	—	—	C X 1
115	26-9	1.71	B ₁	—	0.477	—	0.316	C X 1
116	27-1	7.02	B ₂	2.28	2.32	0.011	0.010	C C
117	27-3	3.32	B ₂	1.56	1.77	0.059	0.038	C X 2

118	27-4	2.94	B ₂	1.33	1.62	0.092	0.053	C X 2
119	27-5	5.35	B ₂	2.11	2.18	0.017	0.015	C X 1
120	27-6	3.39	B ₂	1.60	1.79	0.055	0.037	C X 1
121	27-7	2.81	B ₂	1.23	1.55	0.109	0.061	C X 1
122	27-8	2.20	B ₂	0.449	1.12	0.326	0.131	C X 2

ランク別メッシュ数と全体メッシュ数(1,665)に対する比率

ランク A	1 4	14/122 = 0.115	14/1,665 = 0.00841
B ₁	2 4	24/122 = 0.197	24/1,665 = 0.0144
B ₂	8 4	84/122 = 0.689	84/1,665 = 0.0505
計	1 2 2		122/1,665 = 0.0733

勾配
(°)

凡例 ●: 危険度ランク A、○: 危険度ランク B1、△: 危険度ランク B2
■: 危険度ランク B3、□: 危険度ランク C

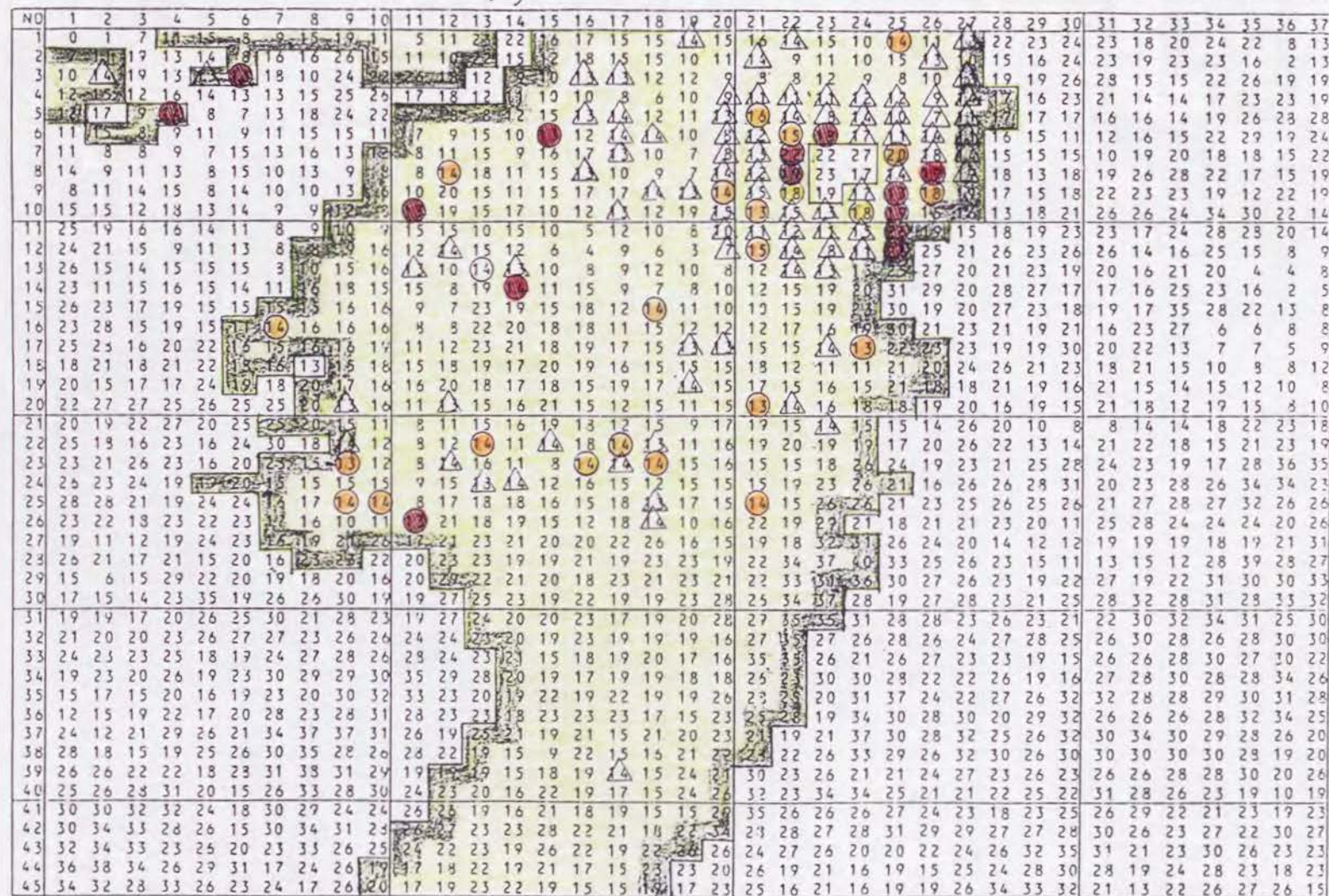
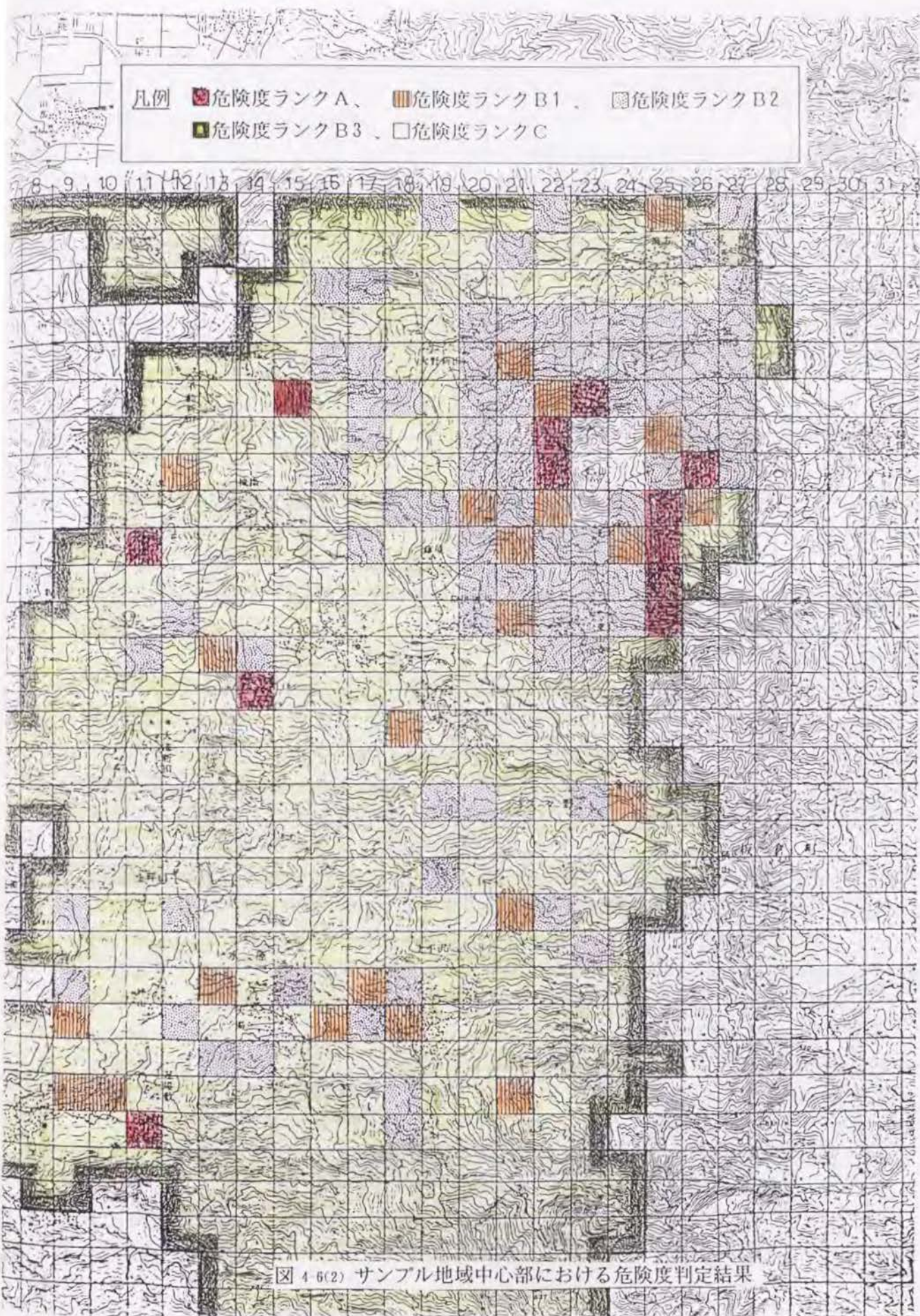


図 4-6(1) 各メッシュの勾配と危険箇所抽出例(新潟県荒井地区)



従って、 B_2 ランク以上の斜面には、同一の危険度ランク内においても、 $P(F)_A$ や $P(F)_{B1}$ の大きいものから順にプライオリティを付し、警戒・避難計画や防災対策を検討することが可能となる。

さらに、 $P(F)_A$ 、 $P(F)_{B1}$ を極力正確に求めるためには、既存の土質資料を整理しておくとともに、新たな土質強度のばらつきに関する調査の推進が望まれる。

4. 3. 3 サンプル地域における地すべり分布図と危険度判定結果の比較

ここで行った危険度判定結果を考察する意味で、前節までのスクリーニングにより抽出されたメッシュについて判定された危険度を実際の地すべり分布と比較したものが図4-7である。図4-7の地すべり分布は航空写真より判読された地すべり跡地を示したものであり、そのすべてが初生地すべりではない。

地すべり分布と危険度判定結果を比較した結果は次のようである。

①図4-7によれば、スクリーニング1により地すべり発生率の高い地質構造を抽出した、貫入岩周辺の危険度ランク B_2 （図4-7の右上丈ヶ山周辺）では地すべりの分布は確かに多いものとなっている。これは、地すべりを生じやすい、従って初生地すべりも生じ易い地質条件の場所を選んだ結果である。

②また、図4-7によれば、発生率の高い地質（地層）に基づくスクリーニング2による抽出で判定する危険度Cと B_3 以上を比べると、明らかに地すべりの分布は危険度Cの方が少ない。

③図4-7中、危険度が B_3 以上のランクのメッシュは、そのほとんどすべてに地すべりを有するが、CSSDPにより安定計算を行って危険度を判定した B_2 ランク以上のメッシュには地すべりを含まないものもある。

これは、地すべりそのものは移動後安定な斜面となるものもあり、地すべりを含まない斜面の方が現況安全率 F_s が低くなることがあるからである。つまり、本論文では、初生地すべりの危険度を判定しており、地すべり跡地でない所の危険度が高くなる可能性がある得ると考えられる。

④調査に用いる地形図には、有史以前からの地すべり跡地が多数含まれるため、各地すべり発生前の地形図に、本論文の危険度判定手法を適用して危険度判定を行い、その結果と各地すべり発生後の地形図を比較することは不可能である。従って、初生地すべりに対する危険度判定が正確に行われているかどうかを、本節での比較において、危険度の高いメッシュが地すべりを有するかどうかにより判断するのは難しい。

⑤つまり、図4-7においては危険度Aや B_1 ランクのメッシュが地すべりを含まない場合があり、これら地すべりを含まず、かつ危険度の高いメッシュの斜面は地すべりの発生により安定な斜面となっておらず、今後、初生地すべりの発生する可能性が高いと解釈される。また、現在地すべりを含んでいて、危険度が高いと判断されたものは、現在までの地すべり発生によってのみでは斜面は十分安定化しておらず、さらに新たな移動を生じる可能性が高いと考えられる。

凡例 ■危険度ランクA、 ■危険度ランクB1、 □危険度ランクB2
■危険度ランクB3、 □危険度ランクC

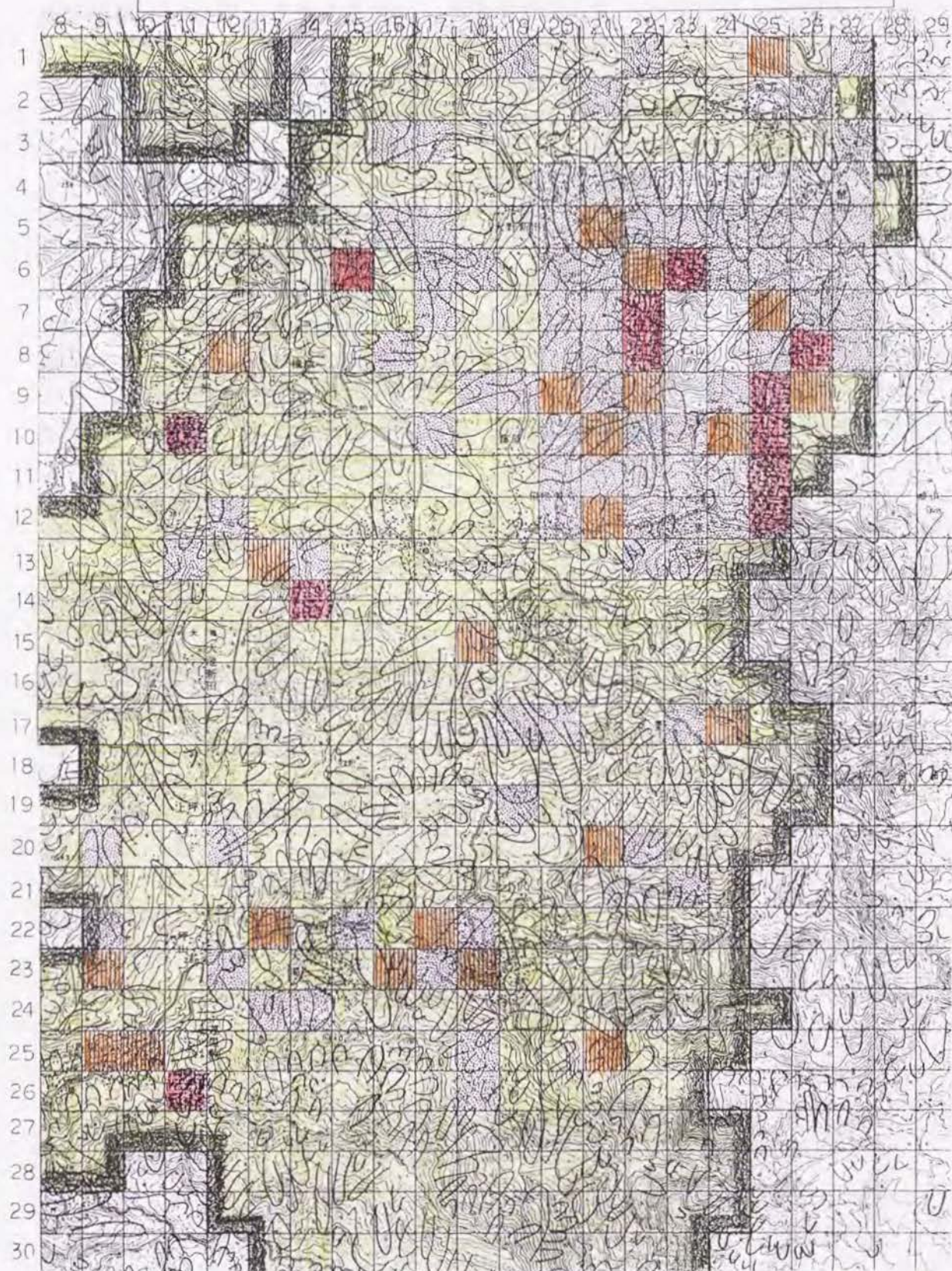


図4-7 サンプル地域中心部における危険度判定結果と
地すべり分布図の比較

4. 4 まとめ

本章では、貫入岩等の地質境界周辺斜面であるかどうかの可否や地形・地質因子（勾配と地質）によって行われる、第2章、第3章のスクリーニングと、臨界すべり面解析（CSSDP）によるスクリーニングを組み合わせた総合的な危険度判定法について述べた。

その中で、危険度区分としては、危険度低のランクC、危険度中低のランクB₃（地質別地すべり発生頻度や勾配別発生頻度が最大のものに属することの可否、あるいは、基準発生率が50%を越えることの可否により区分される）、危険度中のランクB₂、危険度中高のランクB₁、そして危険度高のランクA（この3ランクは、CSSDPで計算したF_{SP}と第3章で求めた基準安全率F_cを比較して区分される）、の計5ランクの危険度区分を提案した。

また、各メッシュ毎のF_{SP}を計算するに際して、CSSDP用に設定する各メッシュ内の測線の決定法を、斜面形別のモデル斜面による計算例を参考にマニュアル化し、極力そのメッシュ内における最小安全率を持つ断面、すなわち、最も危険な断面に対しCSSDPを適用できるように考えた。つまり、モデル斜面を用いて斜面形とF_{SP}の関係を検討し、その斜面形の等高線パターンより、該当するメッシュ中で最小の安全率を有すると思われる測線を選定できるように工夫した。

さらに、現況安全率F_{SP}を用いるB₂以上の危険度ランクについては、F_{SP}を計算する際に生じる、地盤条件や土質条件の不確定さに起因する錯誤の確率を信頼性解析の手法により評価した。それによると、土質定数の空間的変動の変動係数を知ることによって、あるメッシュが、該当する危険度ランクより危険なさらに上位のランクに属する確率が与えられる。従って、この確率を該当する危険度（A、B₁、B₂）に併記すれば、より正確な危険度判定が可能となる。

この初生地すべりに対する危険度区分を、サンプル地域（新潟県新井地区）に適用すると、危険度の高いランクAやB₁に属すると判断されたメッシュに、地すべりが存在しないものも含まれる。このことから、本研究の危険度判定手法が、地すべり履歴のない初生地すべりの危険度を判定し得るものと考ええる。

このようなことから、本章においては、前章の地形・地質による抽出法並びにCSSDPによる抽出法を組み合わせることにより、効率よく地すべり危険斜面が抽出され、さらに、より危険度の高い斜面には臨界すべり面解析に基づく高速処理が可能となる上に、最小現状安全率F_{SP}と基準安全率F_cを比較するという、合理的かつ精度の良い初生地すべり危険度判定法が確立できたものと考ええる。

5. 結 論

この章では、本研究の主な結果を整理し、取りまとめを行う。まず、主要な結果は次のようになる。

1) 初生地すべり発生危険度のスクリーニングを行う場合、まず、斜面の勾配と地質（地層や岩種など）が重要な要因であり、地質別・勾配別の地すべり発生率よりスクリーニングができる。その危険度ランクは危険度低のランクC、危険度中低のB₃、危険度中のB₂、危険度中高のB₁、危険度高のAの計5ランクとした。

2) 地質別・勾配別のスクリーニング後に抽出された危険度の高いランクB₂～Aのメッシュは少数となるので、判定精度を上げる為、安全率による危険度判定を行うこととした。その手法として、少ない情報量で迅速に計算が可能な臨界すべり面解析によって、外力を付加しない状態の現状安全率F_{SP}を求め、これを、ある基準安全率と比較する方法を検討した。

3) この際に必要な基準安全率F_{ci}(i: 1, 2)は、全国の既往地すべり事例に関するF_{SP}の頻度分布に基づき、2つのものを設定した。すなわち、危険度ランクAとランクB₁を分けるF_{c2}=1.5、危険度ランクB₁とランクB₂を分けるF_{c1}=2.0の2つの基準安全率を得た。

4) さらに、危険度ランクB₂～Aに関しては、F_{SP}を計算する際に用いる地盤条件や土質定数の不確定さに基づく錯誤、つまり、より危険度の高いランクに属する確率P(F)を信頼性解析の応用により求め、危険度ランクに併記し、斜面を均質地盤と仮定したことによる誤差の評価を行った。

5) サンプル地区（新井地区）にこの手法を適用すると、地質境界周辺斜面であるかどうかの可否と地質別・勾配別地すべり発生率によるスクリーニングであるスクリーニング1、2、3において、全メッシュの10%程度が、ランクB₂以上の高い危険度ランクに抽出され、CSSDPによるスクリーニングにかけられた。

このCSSDPによるスクリーニング4では、最終的にランクAが全体の1%程度、B₂が5%程度の割合で抽出された。ランクA、B₁に属するような危険度の高いメッシュにも地すべりの分布が見られない未発生斜面が含まれており、初生地すべりに対する危険度区分に、この手法が適用できることが示された。

ただし、より危険度が大きいランクに属する確率P(F)が4割以上に達する例もあり、この点は、本研究を警戒・避難計画などに応用し対策の優先度を考える場合考慮に入れ、P(F)の高いものから順に施策を講じて行く必要があると思われる。

以上、ここで、述べた手法は、貫入岩周辺など地質境界部周辺に関する初生地すべりの危険度を地形・地質などの素因で判定するのみならず、現状安全率F_{SP}ならびに基準安全率F_{ci}という概念を用いることにより、地震力や間隙水圧の上昇など

誘因の影響をも配慮し得るものである。

同時に、すべり面が未知な場合においても、最小安全率を持つすべり面（臨界すべり面）とその最小安全率が少ない情報量で高速に探索・計算できる臨界すべり面解析を応用したことにより、本研究における手法は、すべり面の確定していない初生地すべりの危険度判定に非常に有用なものであると考えられる。

また、本研究において、地質境界周辺斜面における地すべり危険箇所抽出に関する地形・地質因子（勾配、地層、岩種等）および現状安全率に対する危険度の指標である基準安全率（ F_{c1} 、 F_{c2} ）と、それらを用いた危険箇所抽出法が示されるとともに、斜面情報の簡略化（均質斜面の仮定）に伴う誤差や土質定数のばらつきに起因する誤差を、信頼性解析に基づき評価できる優れた危険度判定法が得られたことは、大きな成果である。

6. 謝 辞

最後に、本研究を進めるに当たって、数々のご助言・ご指導をいただいた京都大学農学部林学科砂防学研究室の小橋澄治教授に深く感謝いたします。

また、惜しめない励ましとご助言をいただいた京都大学農学部林学科砂防学研究室の水山高久助教授、東京農工大学農学部環境・資源学科の中村浩之助教授（元建設省土木研究所地すべり研究室長）に深く感謝いたします。

さらに、資料提供など多大なご協力をいただいた建設省土木研究所砂防部地すべり研究室の石濱茂枝官に感謝いたします。そして、本論文のワープロ入力を補助するとともに、研究の遂行を支援してくれた妻真奈美にこの論文を捧げます。

参考文献一覧

Arai, K et.al.: Determination of noncircular slip surface giving the minimum factor of safety in slope stability analysis, 土と基礎, vol.25 no. 1 1985.

Whitman, R. V. : Evaluating calculated risk in geotechnical engineering, Proc. ASCE, GT110, no.2, 1984.

鶴飼恵三: 粘性土斜面の三次元安定解析、土木学会論文集、第364号、Ⅲ 4、1985。

Carrara, A et.al.: Landslide inventory in northern Calabria, southern Italy, Geol. Soc. America Bull., vol.87 no.8, 1976.

California division of mines and geology: Analysis mudslide risk in Southern Ventura County, California CDMG openfile, 1971.

Kawakami, H: Landslide risk mapping by quantification method, Proc. 4th ISL Toronto, vol.2, 1984.

Kienholz, H.: Assessment of slope stability in the Nepalese middle mountains, Proc. 4th ICFL Tokyo, 1985.

Keefer, D. K.: Preliminary assessment of seismically induced landslide susceptibility, Geological survey circular, no. 807, 1979.

久保田哲也、中村浩之: 臨界すべり面解析と信頼性解析を応用した地すべり・崩壊危険度の判定法、地すべり、vol.27 no.4、1991。

建設省土木研究所: 地震に伴う大規模斜面前壊に関する研究、土木研究所資料 第2544号、1988。

建設省土木研究所: 地すべりの実態統計(その1)、土木研究所資料 第987号、1975。

申潤植、板垣治: 地すべり(その4)、土と基礎、vol.31、no.7、1983。

Styles, K. A. et.al.: Terrain classification methods for development planning and geotechnical appraisal, A Hong Kong case, Proc. 4th ISL Toronto, vol.1, 1984.

高野秀夫: 新潟第一地すべり試験地について、地すべり研究第8集、1965。

田中耕平: 地震によるランドスライド発生予測図 その現状と問題点、地すべり、vol.19, no.2, 1982.

ZERMOS Project: Bull. B.R.G.M., section III, 1/2, 9 20, 1977.

中村浩之: 黒色泥岩地帯における地すべりの土質工学的特性、地すべり、vol.9, no.2、1971。

中村浩之、久保田哲也: Chen & Chameau 法による地すべり斜面の三次元安定解析法、建設省土木研究所資料 第2281号、1986。

中村浩之、久保田哲也: 地すべり危険箇所について、地すべり、vol.23, no.4、1987。

中村浩之、久保田哲也: 動的計画法を用いた臨界すべり面解析法、建設省土木研究所資料 第2425号、1987。

中村、吉松、久保田、中嶋: 既往地すべり災害実態調査、建設省土木研究所資料第2241号、1985。

鍋島一郎: 動的計画法、数学ライブラリー7、森北出版、1968。

Nilsen, T.H.: Landslide in studies for seismic zonation of San Francisco bay region, USGS, Pro. paper 941 A, 1975.

Nguyen, T.: A slope failure risk assessment method by the fuzzy theory, 土質工学論文報告集 vol.25, no.4, 1985。

New Zealand Geological Survey: Landslide hazard map, Proc. 4th ISL Toronto, vol.1, 1984.

- Haruyama, M., Kitamura, R. : An evaluation method by the quantification theory for the risk degree of landslides caused by rainfall in active volcanic area, Proc. 4th ISL Toronto, vol. 2, 1984.
- Hansen, A. : Slope Instability, chapter 13, John Wiley & Sons Ltd., 1984.
- Pasek, J. et.al. : Systematic registration of slope deformations in Czechoslovakia, bull. of international association of engineering geology, no.16, 1977.
- Viberg, L. : Landslide risk mapping in soft clays in Scandinavia and Canada, Proc. 4th ISL Toronto, vol. 1, 1984.
- Fujita, T. : Slope analysis of landslides in Shikoku Japan, Proc. ISL, New Delhi, 1980.
- Brabb, E. E. : Feasibility and cost of using a computer to prepare landslide susceptibility map of San Francisco bay region, USGS bull. 1443, 1972.
- Baker, R. : Determination of the critical slip surface in slope stability computations, International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, vol. 4, 1980.
- Bonnard, Ch et.al. : Instability risk maps; From the detection to the administration of landslide prone areas, Proc. 4th ISL, Toronto, vol.1, 1984.
- Jacobacci, M. : Slope stability map, Cagli. Folio, 290, Italy, 1974.
- Yamagami, T. et.al. : Noncircular slip surface analysis of the stability of slopes
An application of dynamic programming to the Janbu method 、地すべり、vol.22
no. 4, 1986.
- Radbruch, H. : Estimation relative abundance of landslides in San Francisco bay region, Basic data USGS Hud. 1971.

Leshchinsky, D. et.al.: Three dimensional analysis of slope stability, International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, vol.9, 1985.

Lessing et.al.: Landslide risk assessment, Environmental geology, vol.5 no.2, 1983.

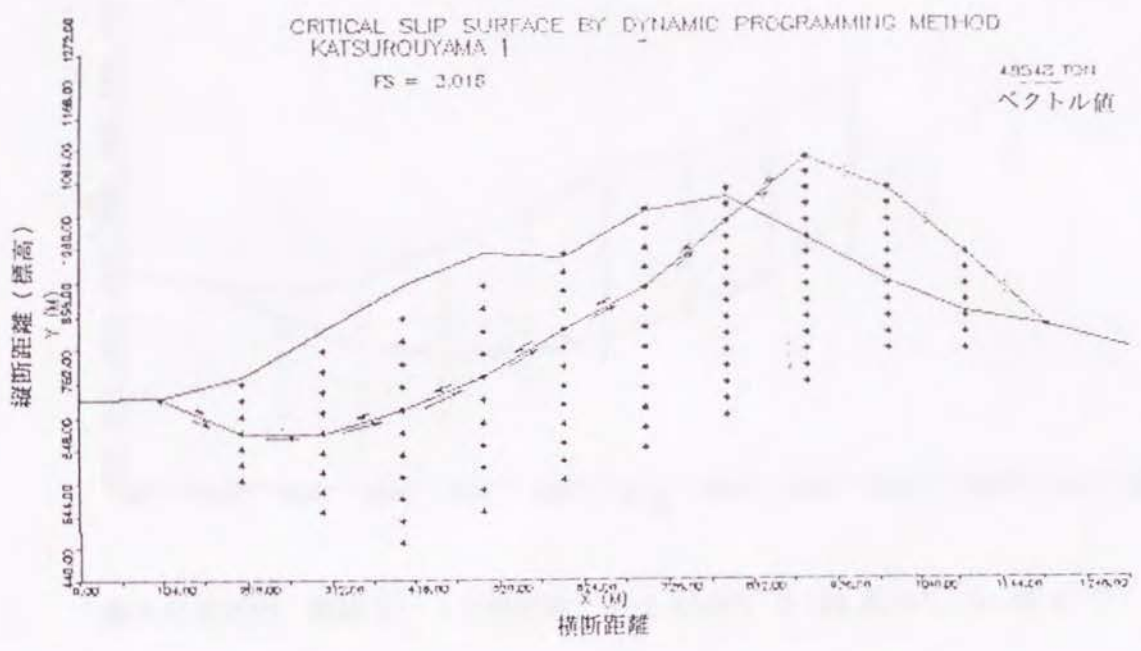
Ward, T. J., et.al.: Landslide potential and probability considering randomness of controlling factors, Proc. Int. Symp. on Risk and reliability in water resources, 26-28 June 1978, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 1978.

渡 正亮: 斜面災害の機構と対策、1986、学位論文(山海堂)。

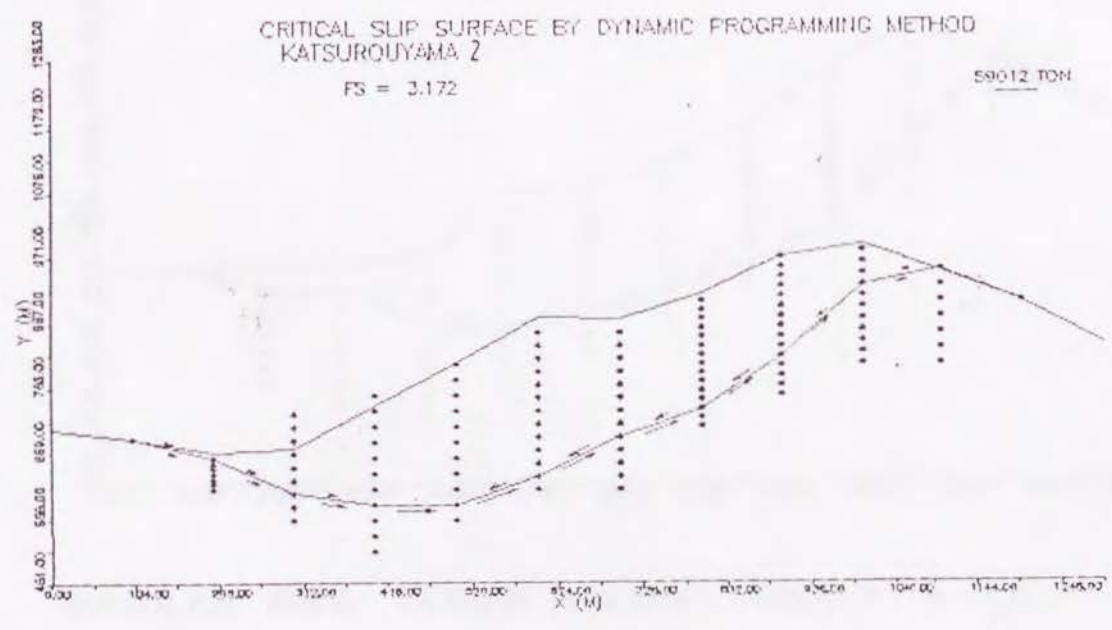
巻末資料

1. 安定計算を行った事例斜面の縦断面と 探索されたすべり面	1
2. 事例斜面の現状安全率と斜面勾配の関係表	27
3. 斜面形状別現状安全率計算のモデル斜面と 探索されたすべり面	30
4. 新井地区丈ヶ山周辺の高危険度メッシュにおける 臨界すべり面解析結果	38
5. 事例地域の地質・勾配別地すべり発生率の表	99

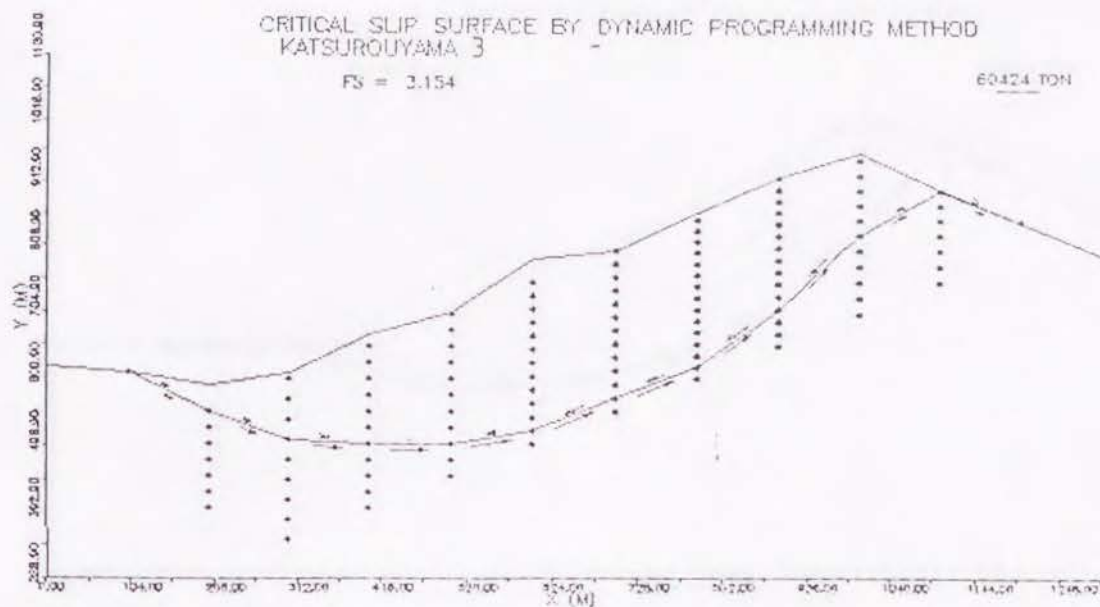
1. 安定計算を行った事例斜面の縦断面と、探索されたすべり面形状



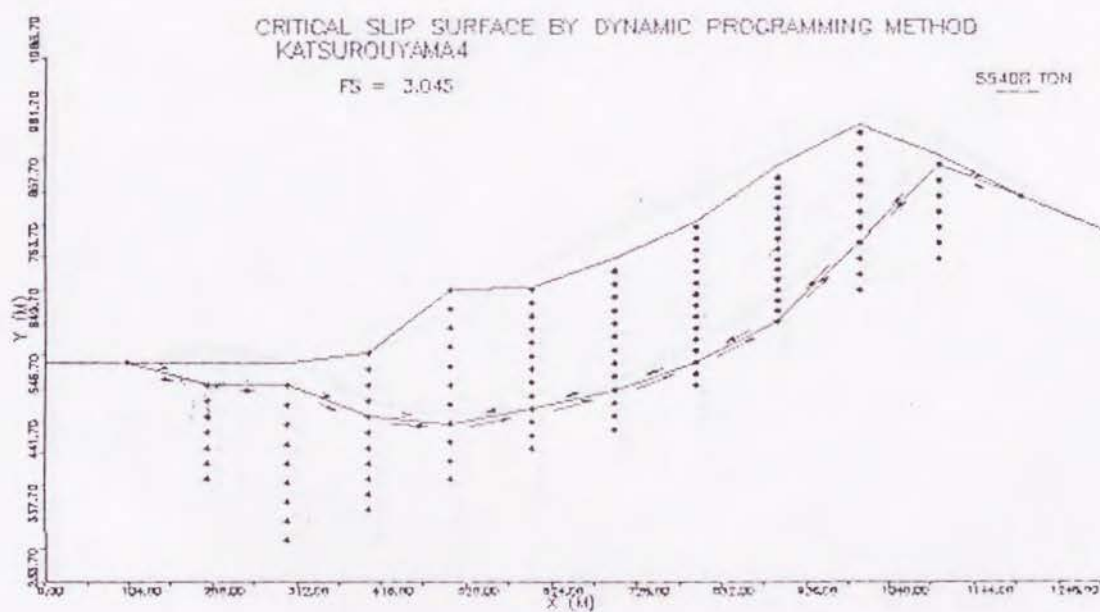
栃木県葛老山 測線1 (土質定数 $\gamma=2.6\text{t/m}^3$, $C=100.0\text{t/m}^2$, $\phi=40.0^\circ$)



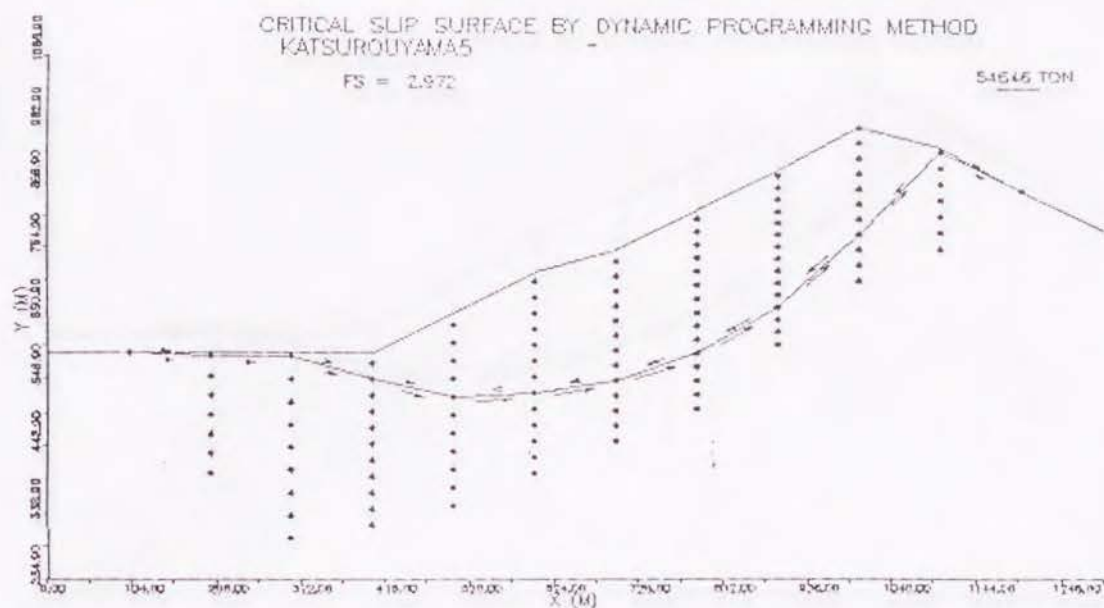
栃木県葛老山 測線2 (土質定数 $\gamma=2.6\text{t/m}^3$, $C=100.0\text{t/m}^2$, $\phi=40.0^\circ$)



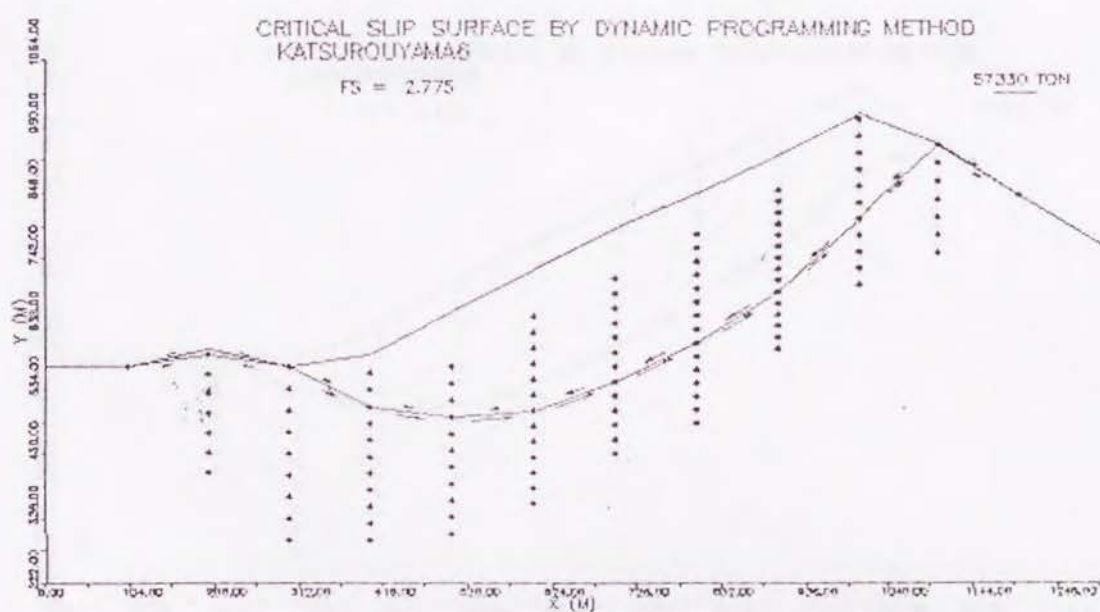
栃木県葛老山 測線3 (土質定数 $\gamma = 2.6 \text{ t/m}^3$, $C = 100.0 \text{ t/m}^2$, $\phi = 40.0^\circ$)



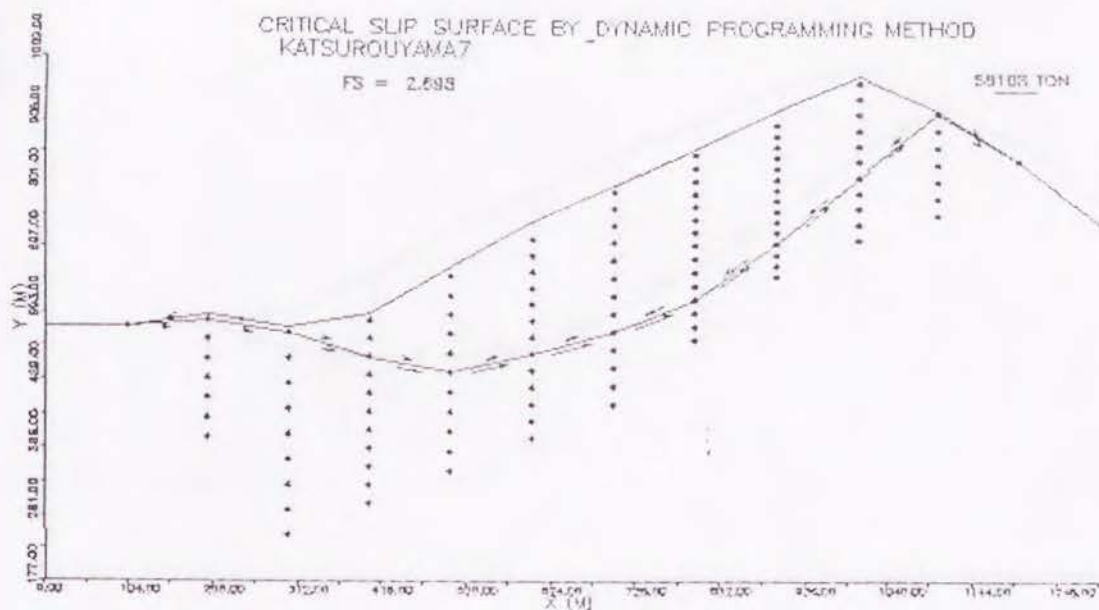
栃木県葛老山 測線4 (土質定数 $\gamma = 2.6 \text{ t/m}^3$, $C = 100.0 \text{ t/m}^2$, $\phi = 40.0^\circ$)



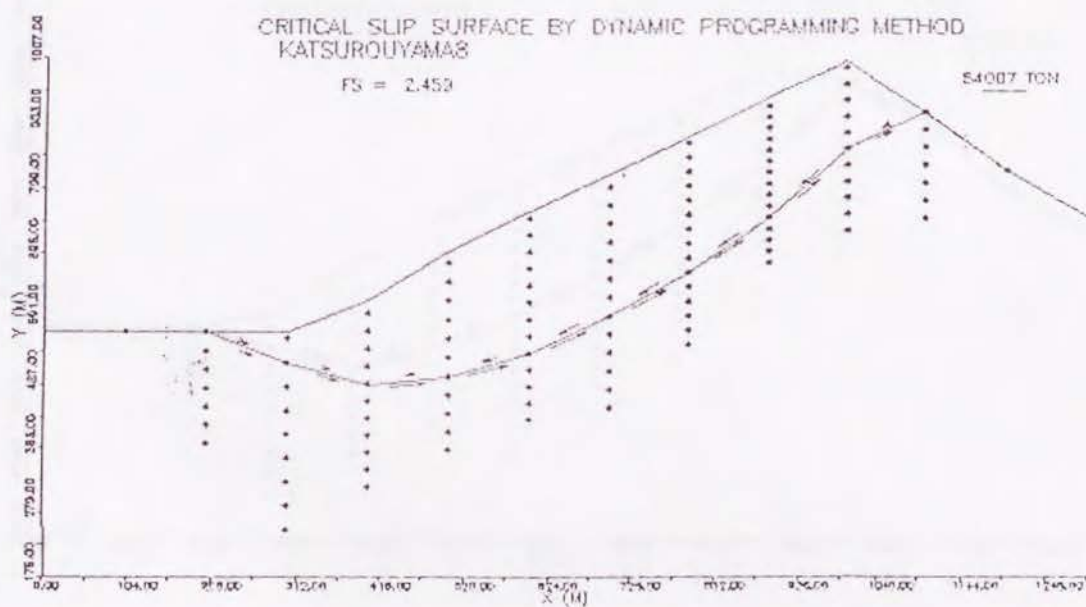
栃木県葛老山 測線5 (土質定数 γ 2.6t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)



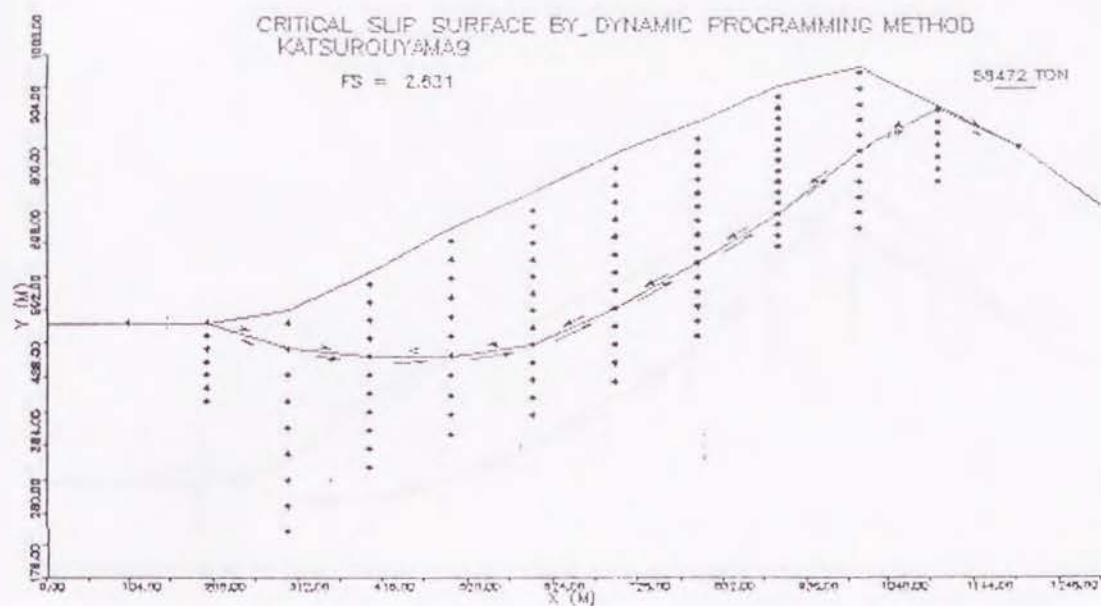
栃木県葛老山 測線6 (土質定数 γ 2.6t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)



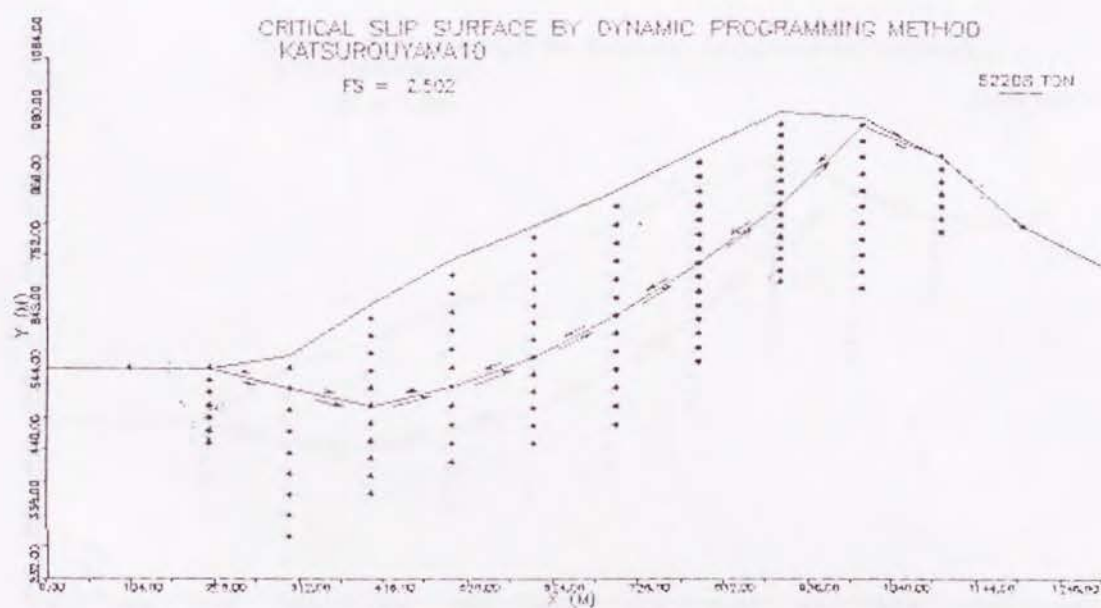
栃木県葛老山 測線7 (土質定数 γ 2.6t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)



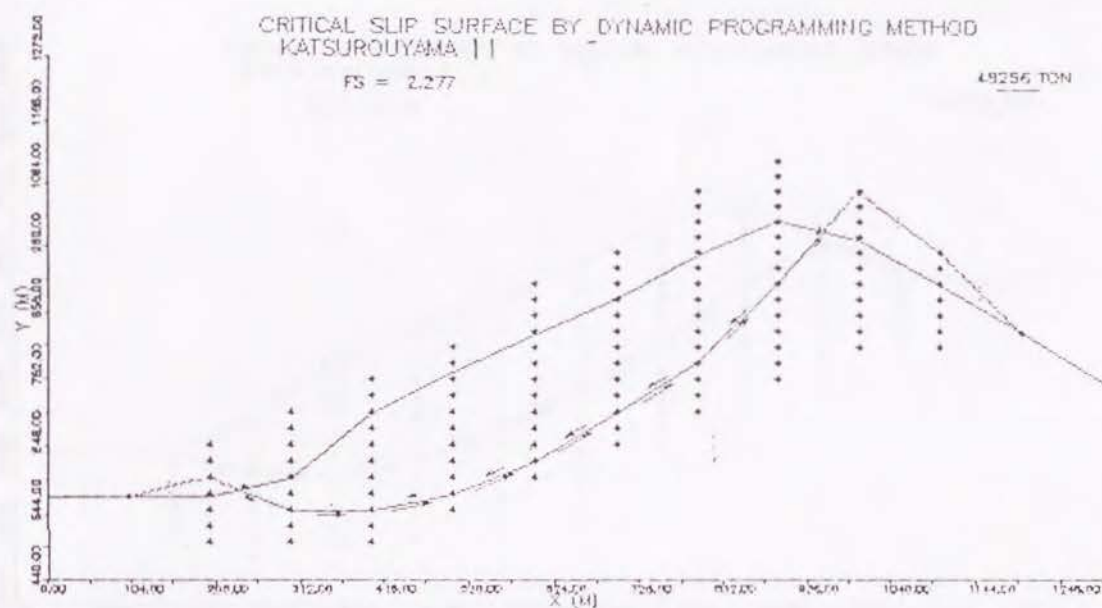
栃木県葛老山 測線8 (土質定数 γ 2.6t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)



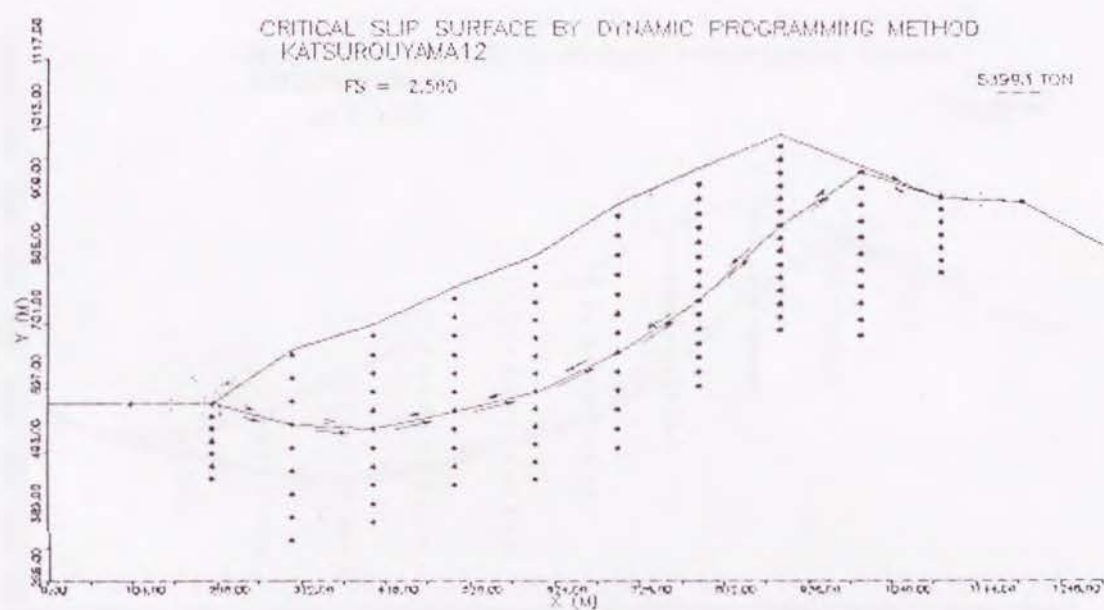
栃木県葛老山 測線9 (土質定数 γ 2.6t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)



栃木県葛老山 測線10 (土質定数 γ 2.6t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)



栃木県葛老山 センター (土質定数 γ 2.6t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)

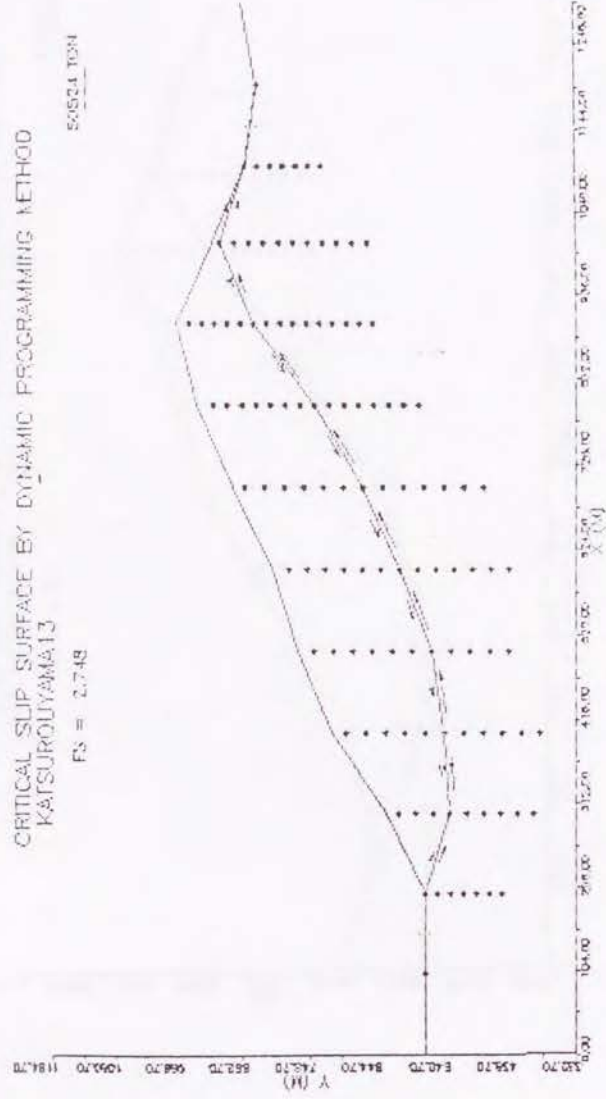


栃木県葛老山 測線12 (土質定数 γ 2.6t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)

CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
KATSURONUYAMA13

FS = 2.748

55524 TON

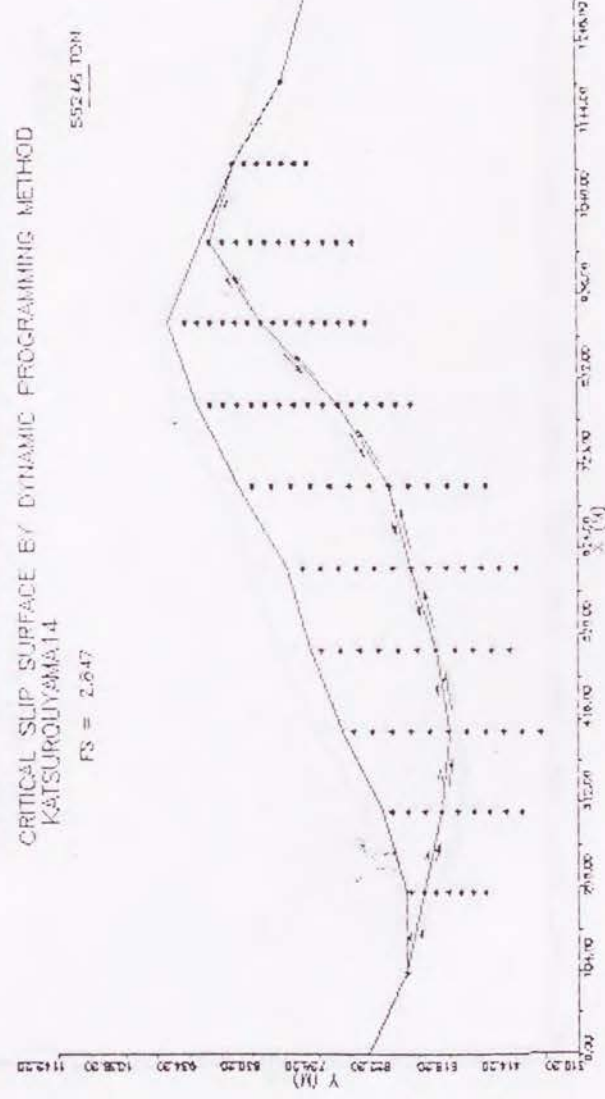


栃木県葛老山 測線13 (土質定数 γ 2.6t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)

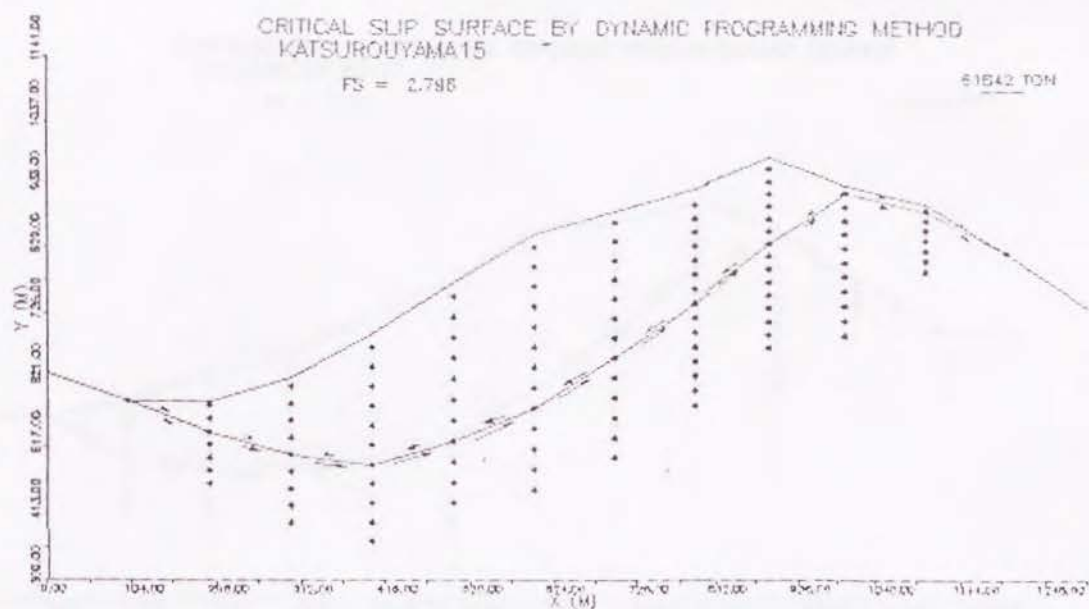
CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
KATSURONUYAMA14

FS = 2.647

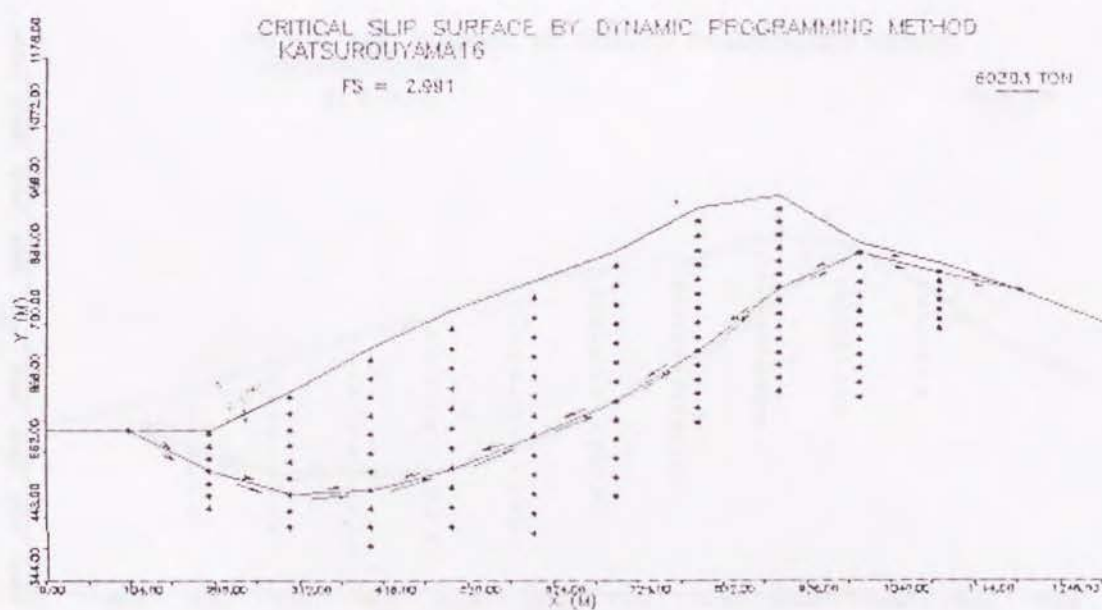
55546 TON



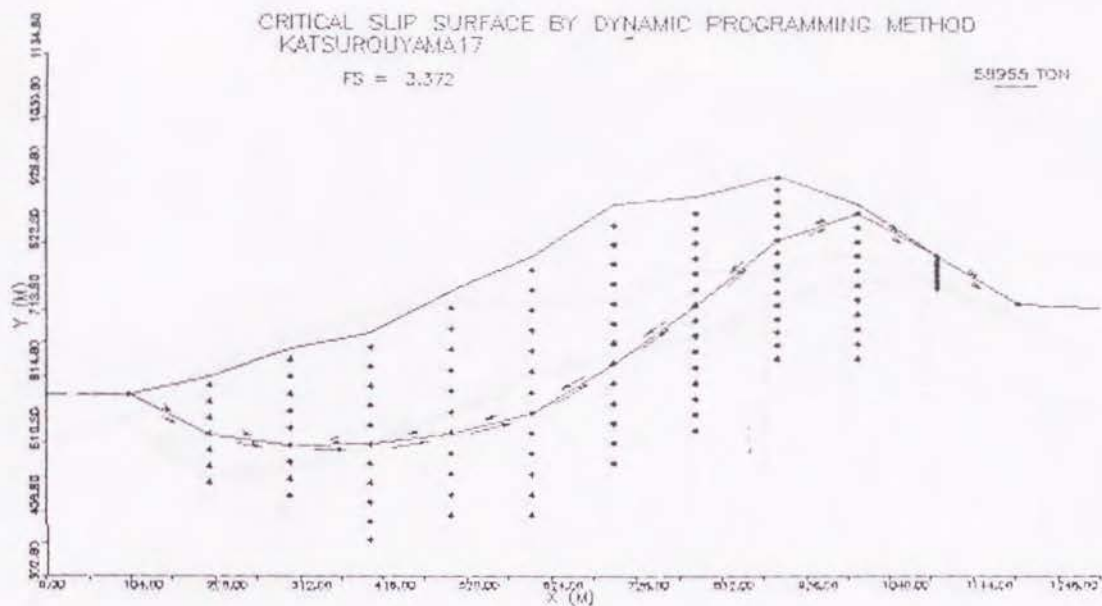
栃木県葛老山 測線14 (土質定数 γ 2.6t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)



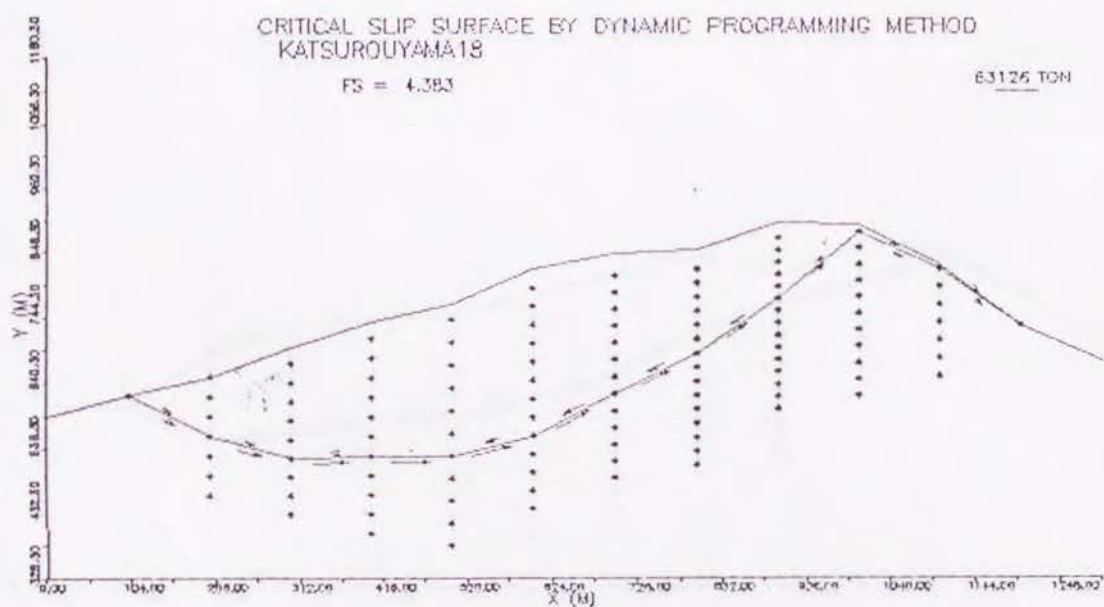
栃木県葛老山 測線15 (土質定数 γ 2.6t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)



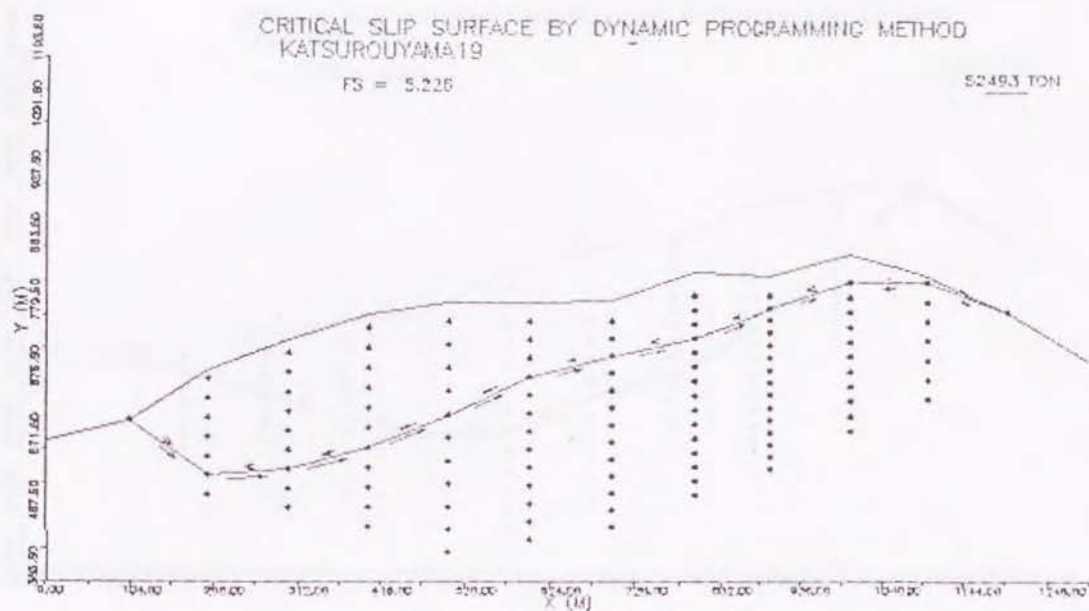
栃木県葛老山 測線16 (土質定数 γ 2.6t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)



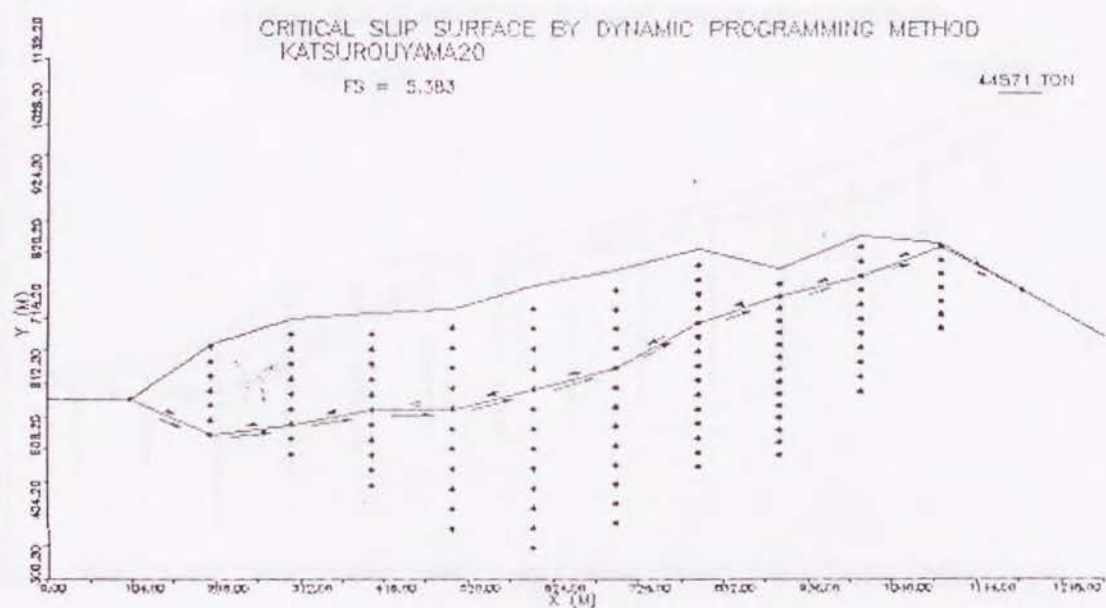
栃木県葛老山 測線17 (土質定数 γ 2.6t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)



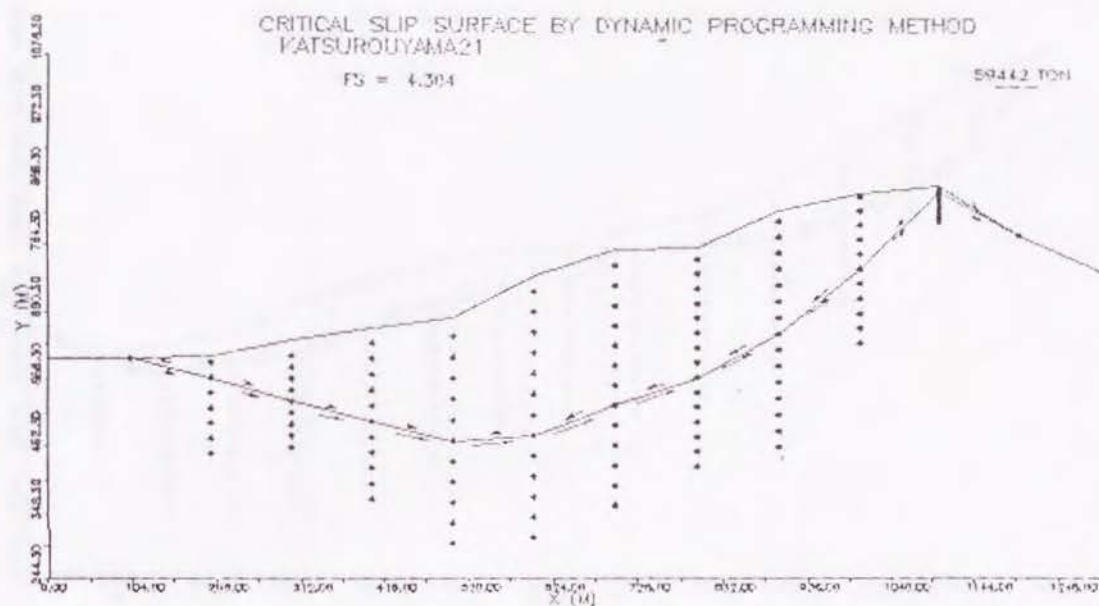
栃木県葛老山 測線18 (土質定数 γ 2.6t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)



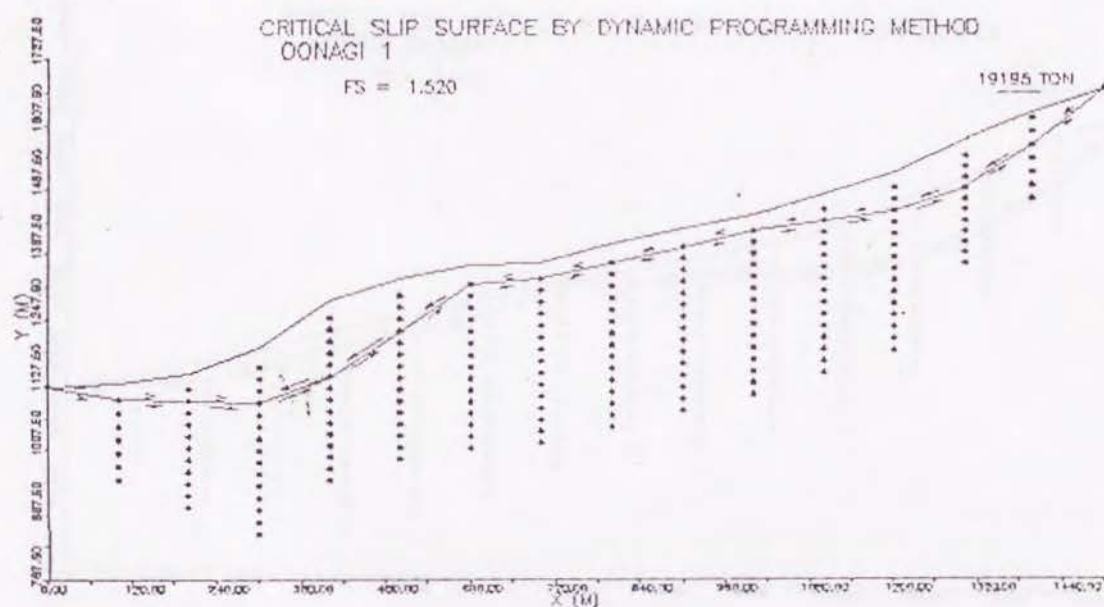
栃木県葛老山 測線19 (土質定数 γ 2.6t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)



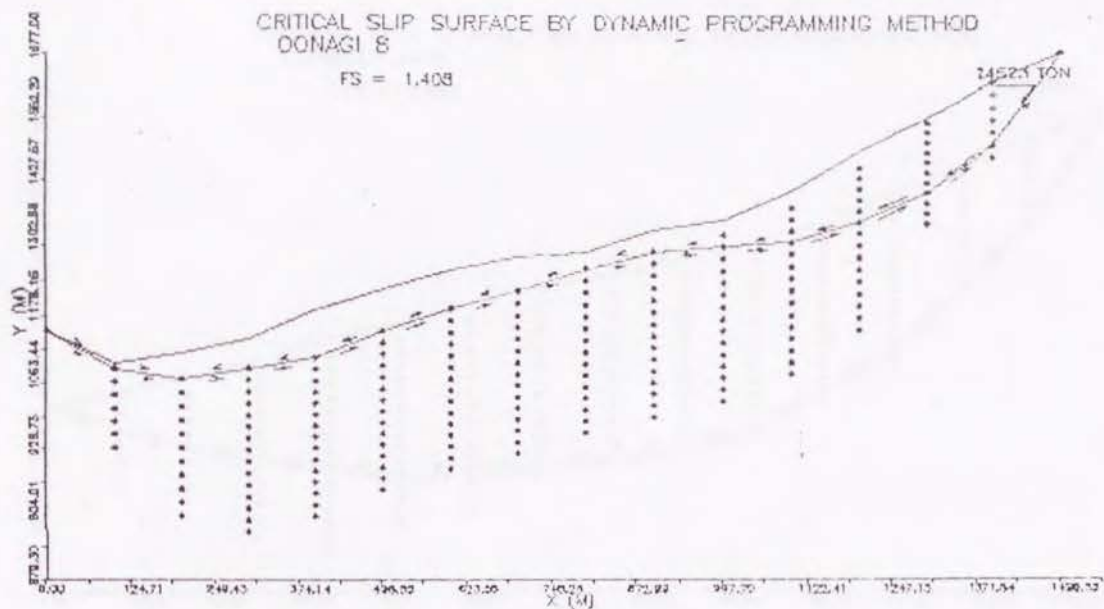
栃木県葛老山 測線20 (土質定数 γ 2.6t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)



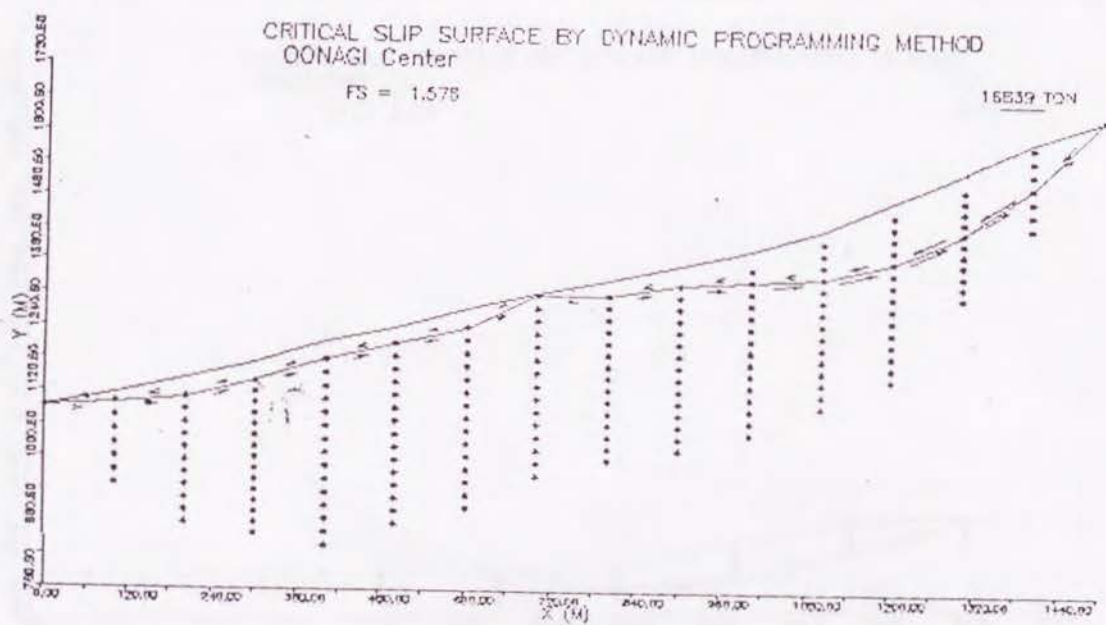
栃木県葛老山 測線21 (土質定数 γ 2.6t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)



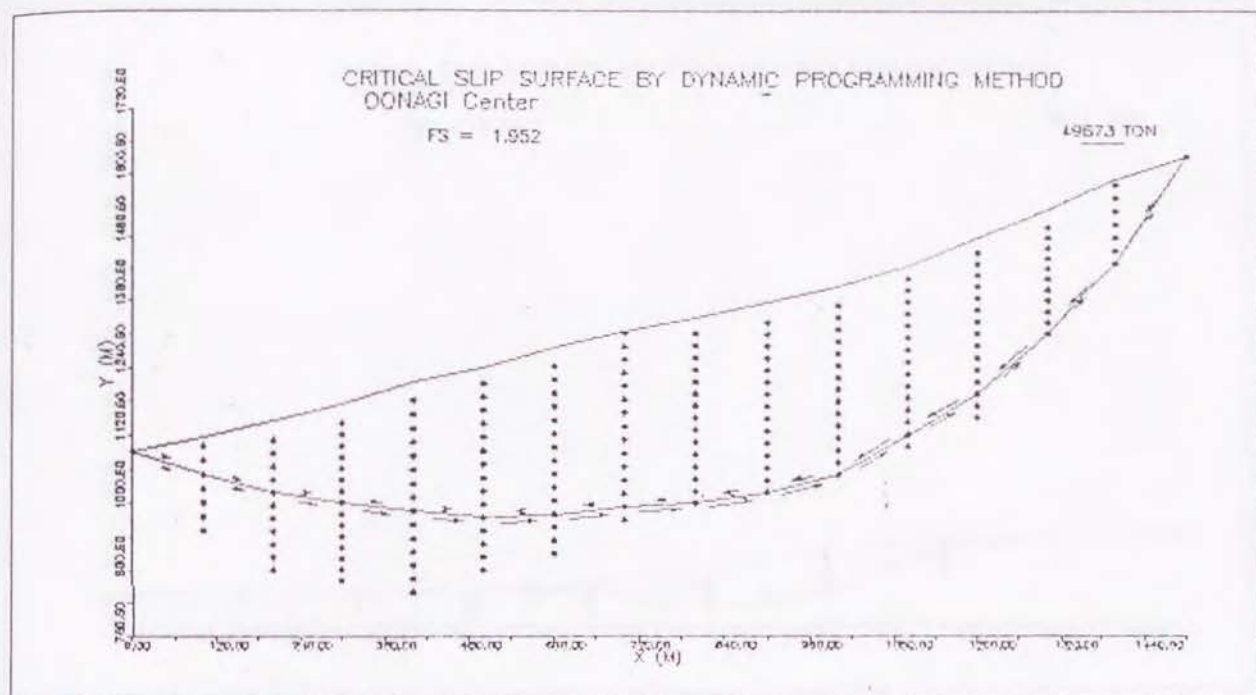
栃木県大薮 測線1 (土質定数 γ 2.6t/m³, C 5.0t/m², ϕ 30.0°)



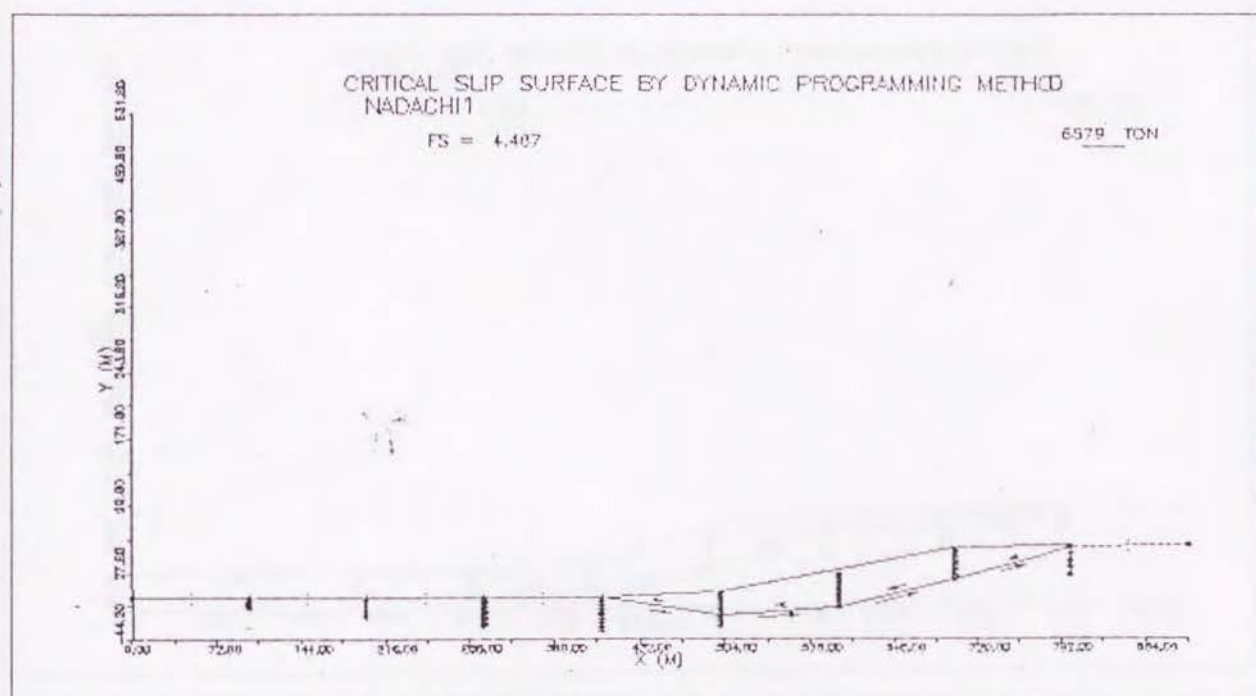
栃木県大薮 測線 8 (土質定数 γ 2.6t/m³, C 5.0t/m², ϕ 30.0°)



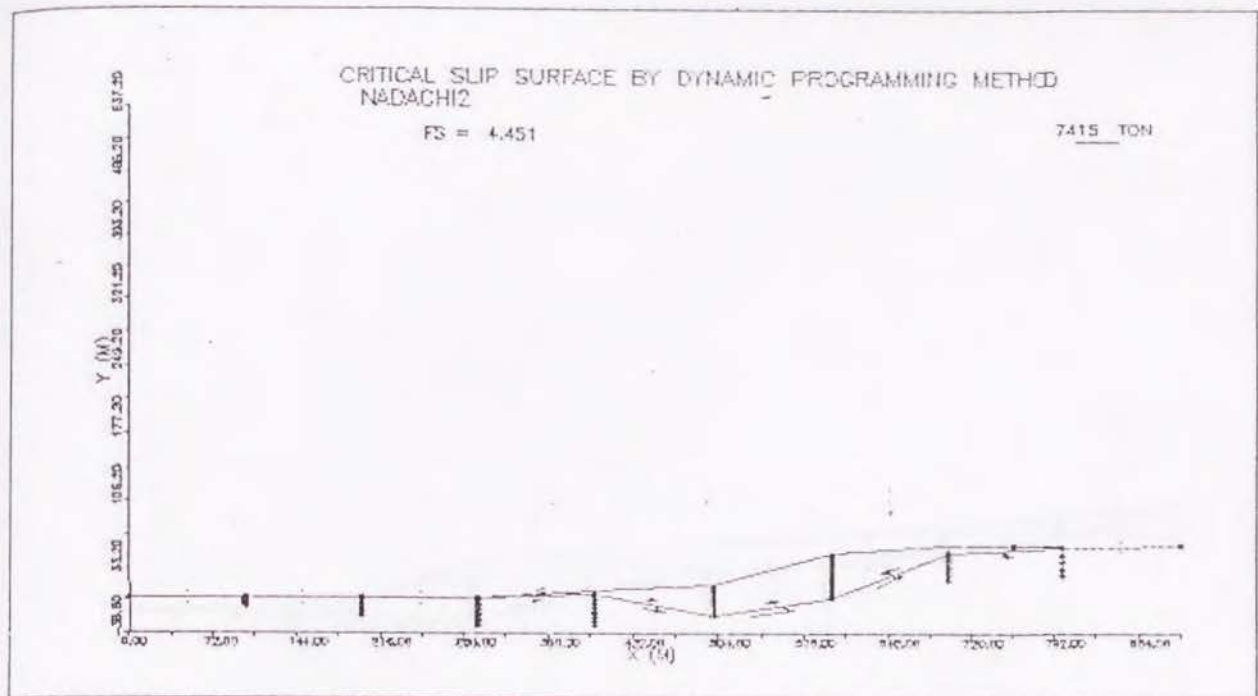
栃木県大薮 センター (土質定数 γ 2.6t/m³, C 5.0t/m², ϕ 30.0°)



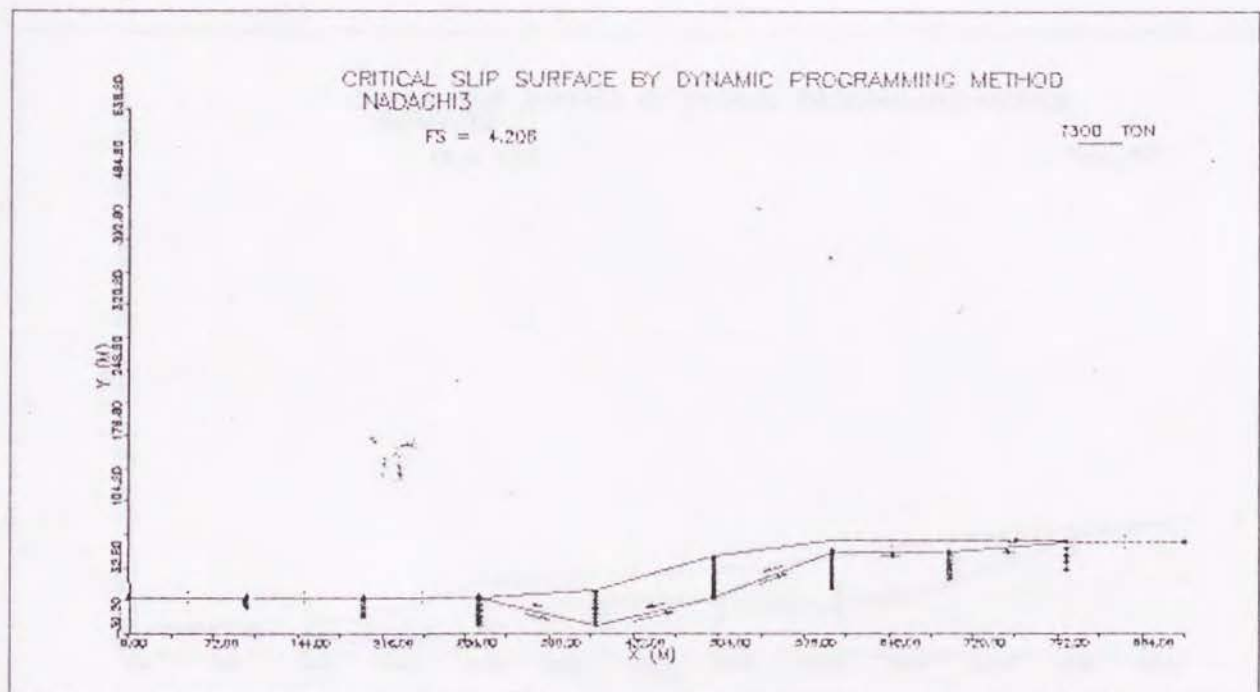
栃木県大薮 センター（参考：凹凸規制使用、土質定数は上記に同じ。）



新潟県名立 測線1（土質定数 γ 2.64t/m³, C 11.9t/m², ϕ 29.7°）



新潟県名立 測線2 (土質定数 γ 2.64t/m³, C 11.9t/m², ϕ 29.7°)

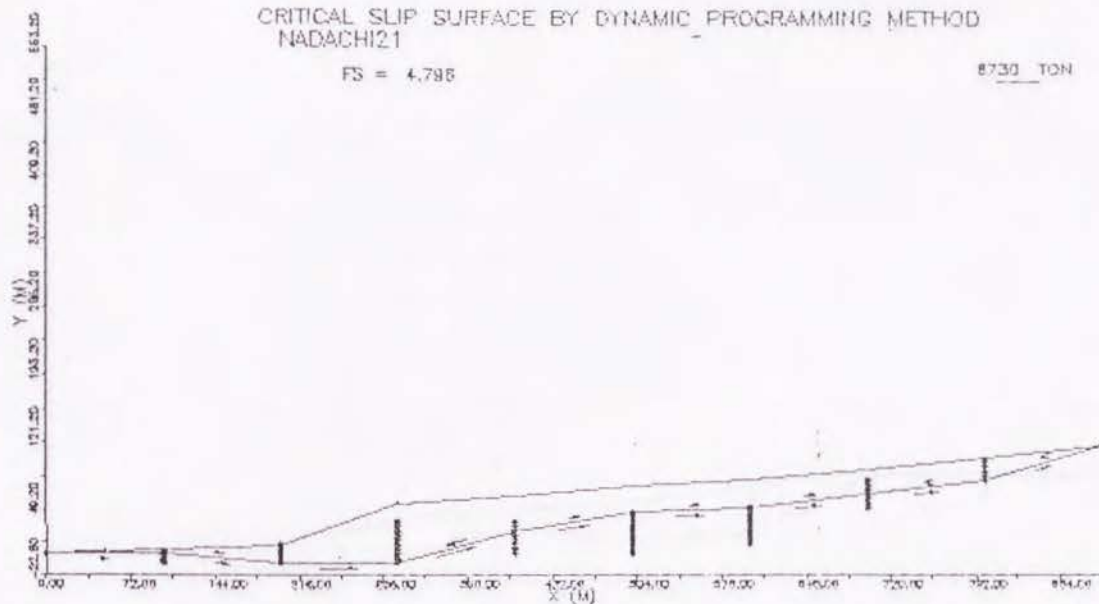


新潟県名立 測線3 (土質定数 γ 2.64t/m³, C 11.9t/m², ϕ 29.7°)

CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
NADACHI21

FS = 4.785

8730 TON

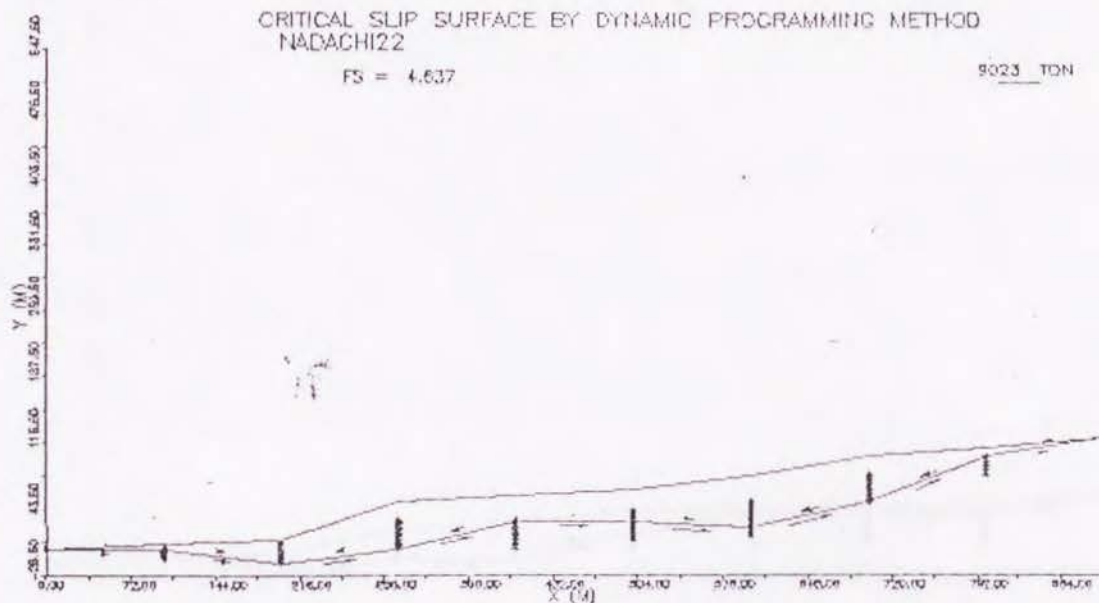


新潟県名立 測線21 (土質定数 γ 2.64t/m³, C 11.9t/m², ϕ 29.7°)

CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
NADACHI22

FS = 4.637

9023 TON

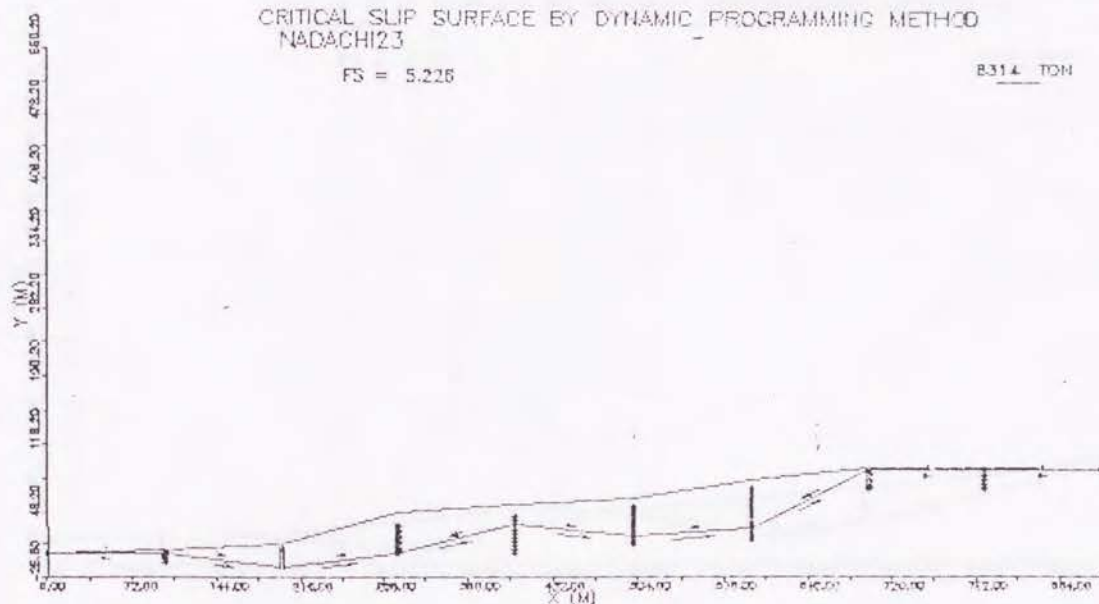


新潟県名立 測線22 (土質定数 γ 2.64t/m³, C 11.9t/m², ϕ 29.7°)

CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
NADACHI23

FS = 5.226

8314 TON

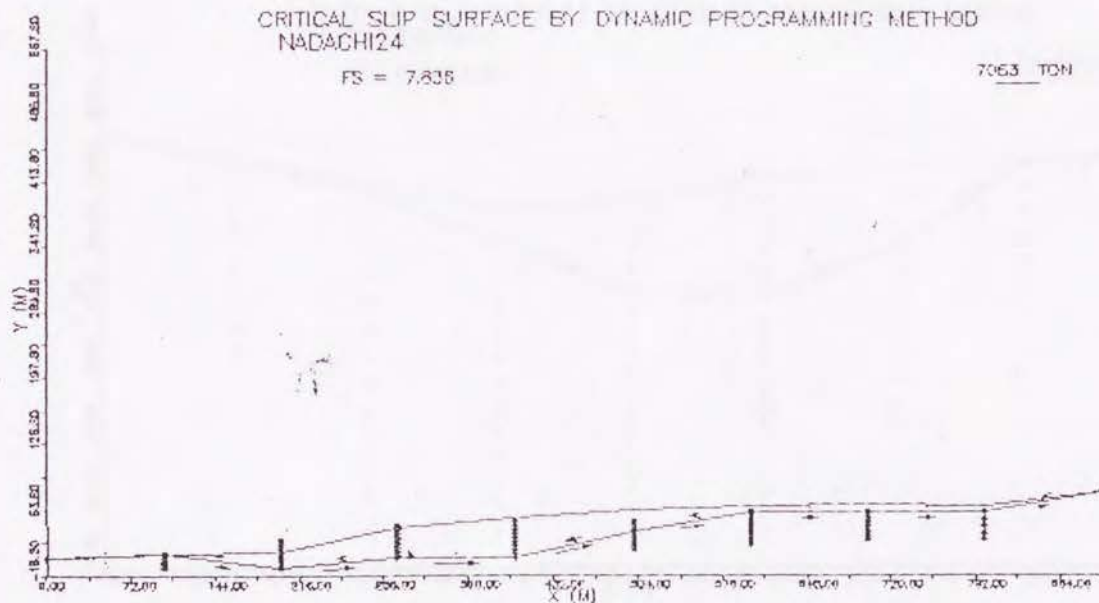


新潟県名立 測線23 (土質定数 γ 2.64t/m³, C 11.9t/m², ϕ 29.7°)

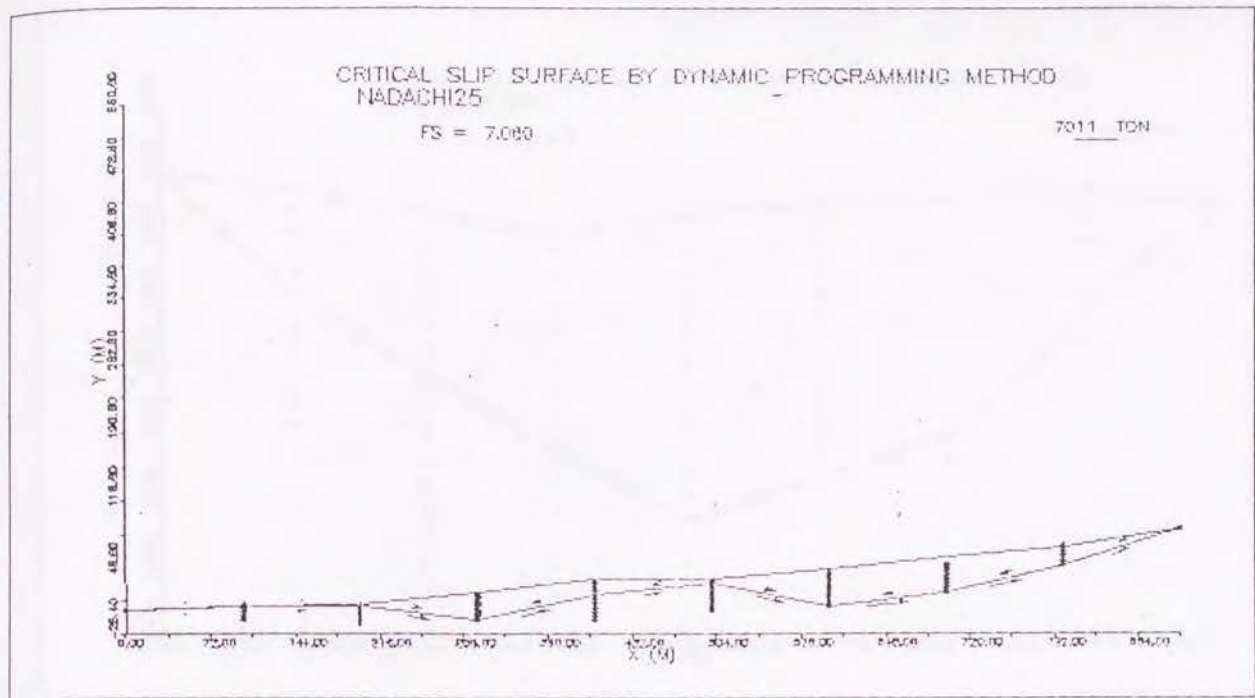
CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
NADACHI24

FS = 7.638

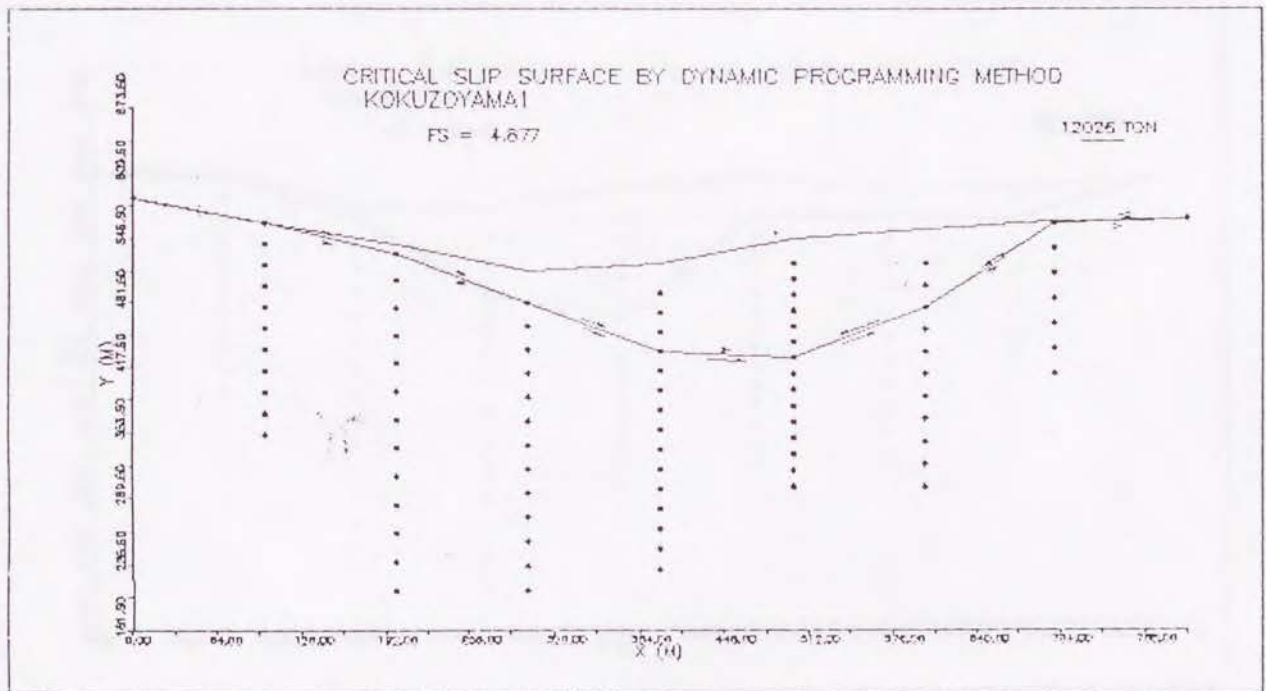
7063 TON



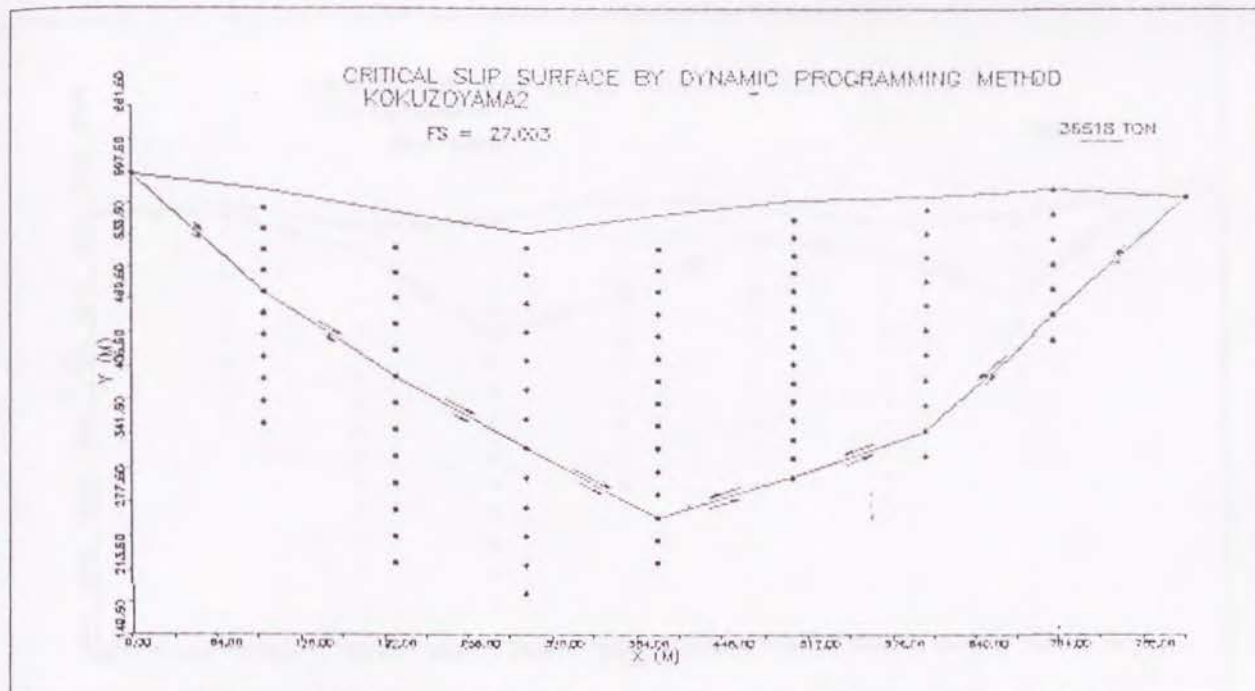
新潟県名立 測線24 (土質定数 γ 2.64t/m³, C 11.9t/m², ϕ 29.7°)



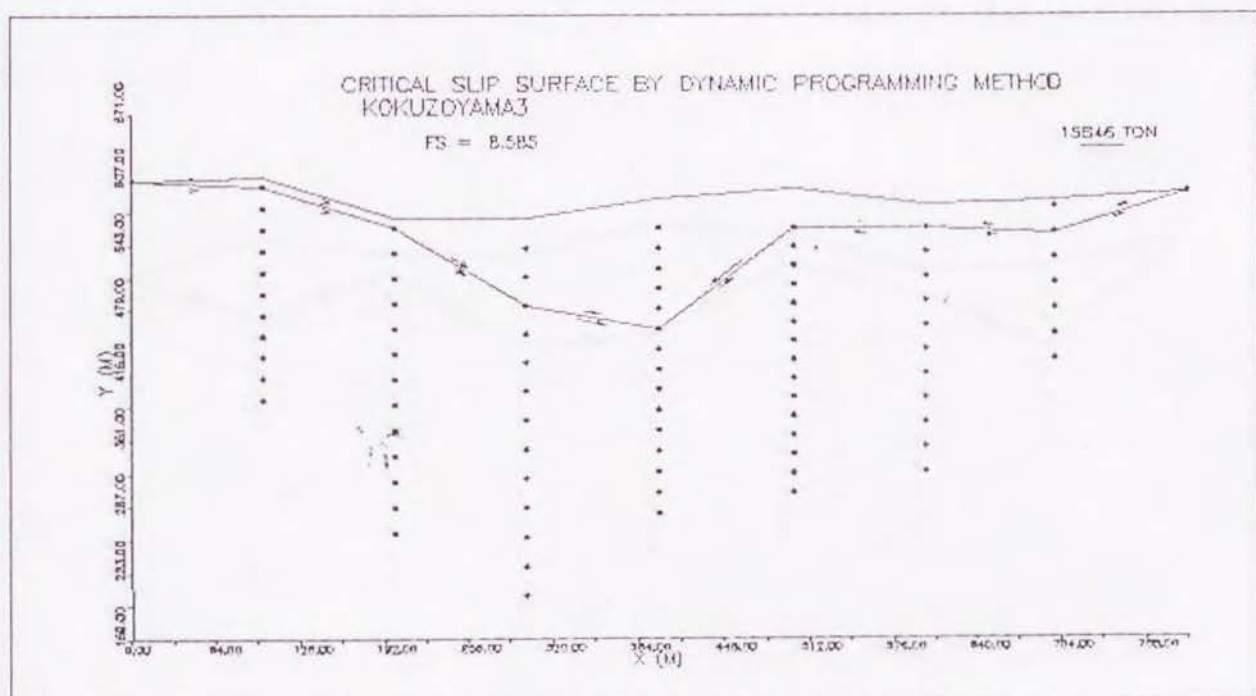
新潟県名立 測線25 (土質定数 γ 2.64t/m³, C 11.9t/m², ϕ 29.7°)



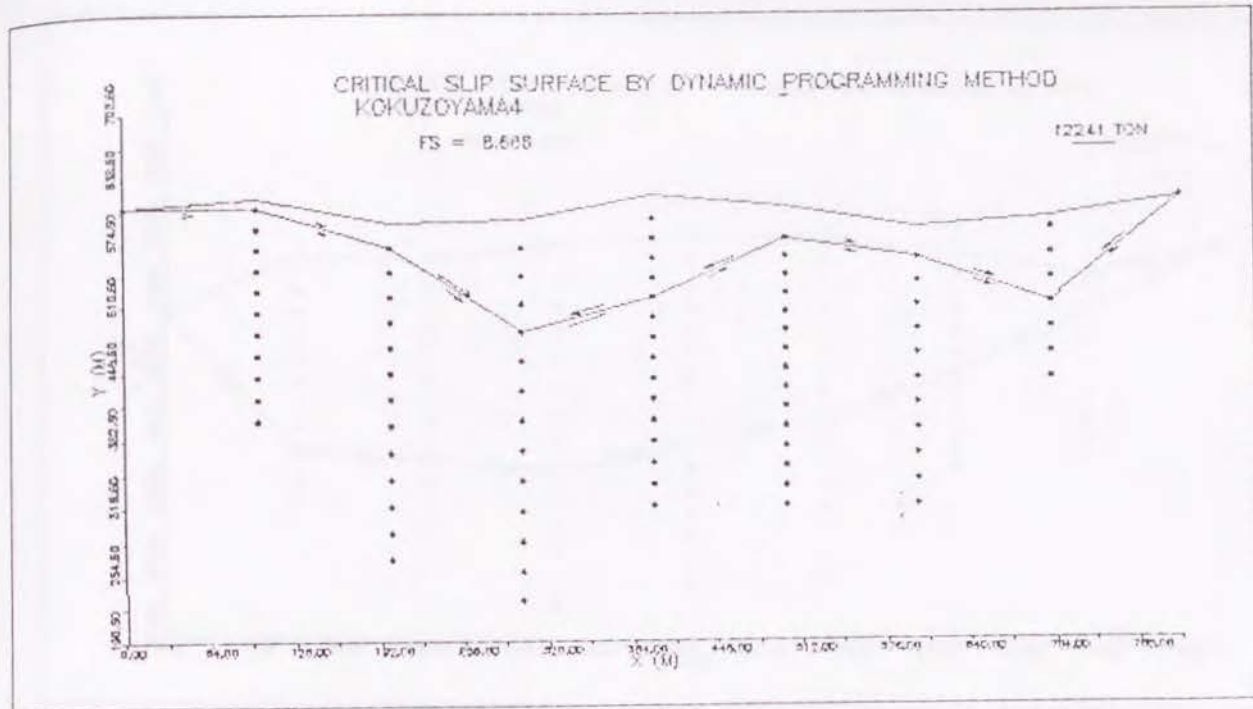
長野県虚空蔵山 測線1 (土質定数 γ 2.7t/m³, C 2.6t/m², ϕ 21.5°)



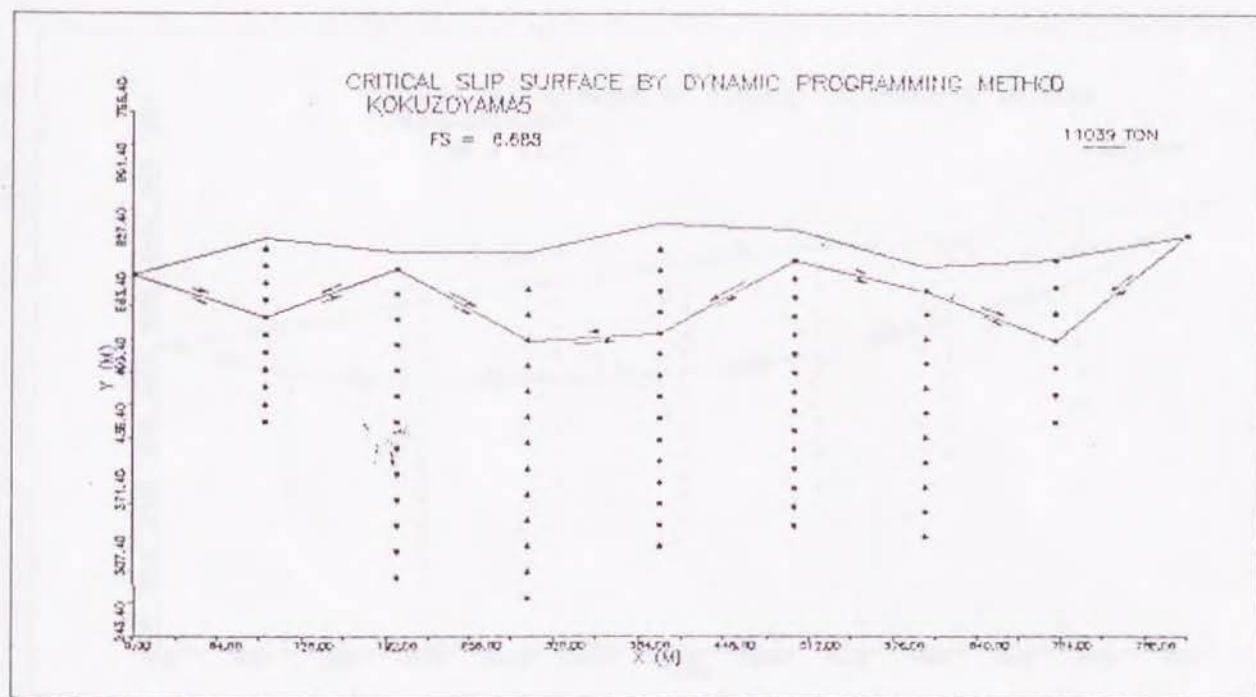
長野県虚空蔵山 測線2 (土質定数 γ 2.7t/m³, C 2.6t/m², ϕ 21.5°)



長野県虚空蔵山 測線3 (土質定数 γ 2.7t/m³, C 2.6t/m², ϕ 21.5°)



長野県虚空蔵山 測線4 (土質定数 γ 2.7t/m³, C 2.6t/m², ϕ 21.5°)

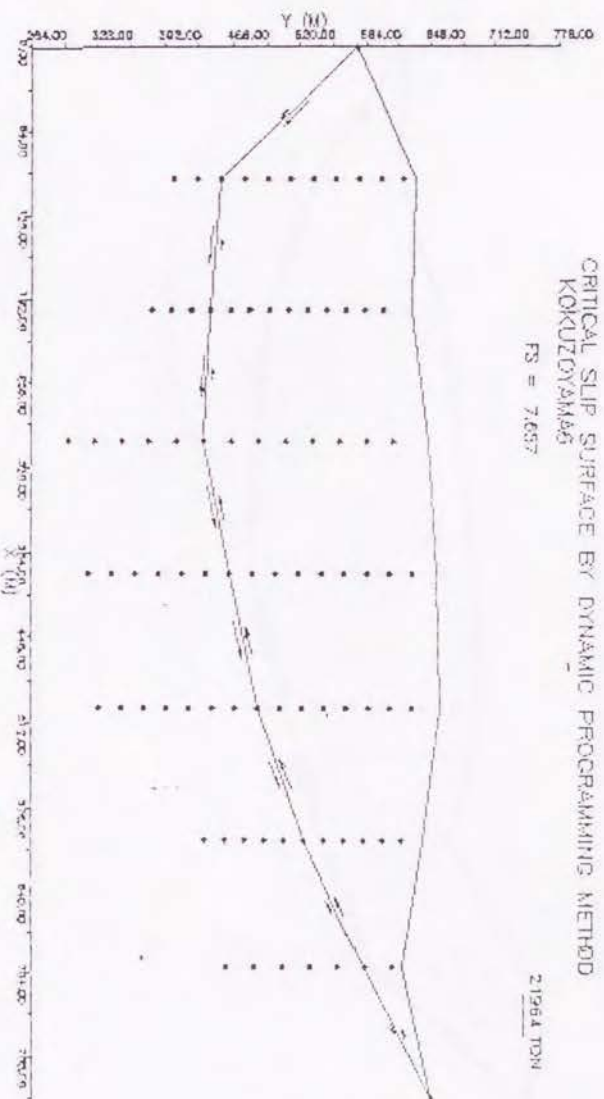


長野県虚空蔵山 測線5 (土質定数 γ 2.7t/m³, C 2.6t/m², ϕ 21.5°)

CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
KOKUZUYAMA6

FS = 7.637

21964 TON

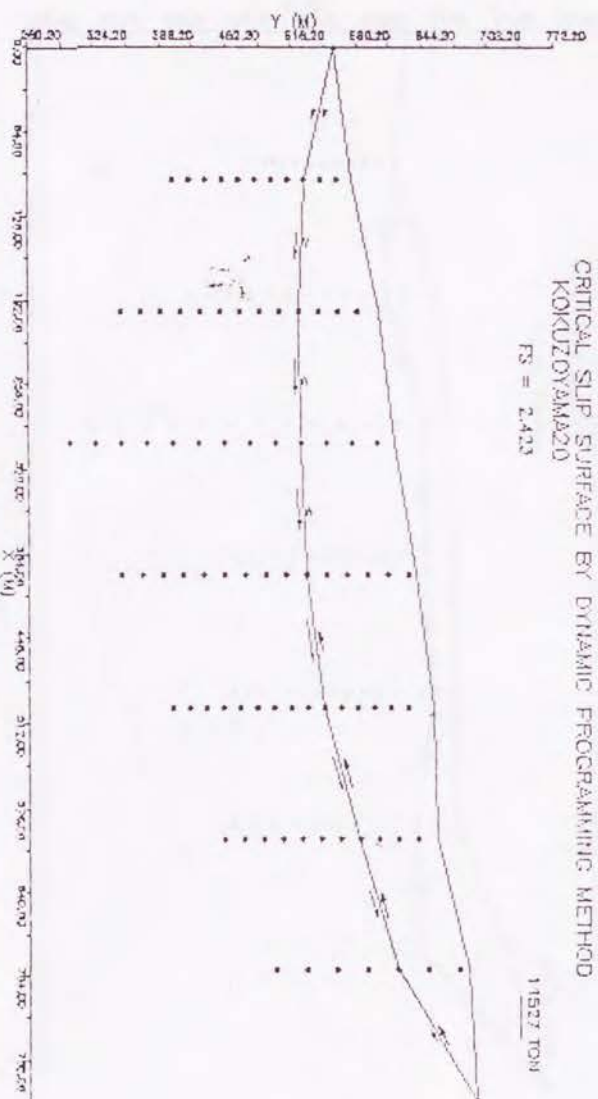


長野県虚空蔵山 測線 6 (土質定数 γ 2.7t/m³, C 2.6t/m², ϕ 21.5°)

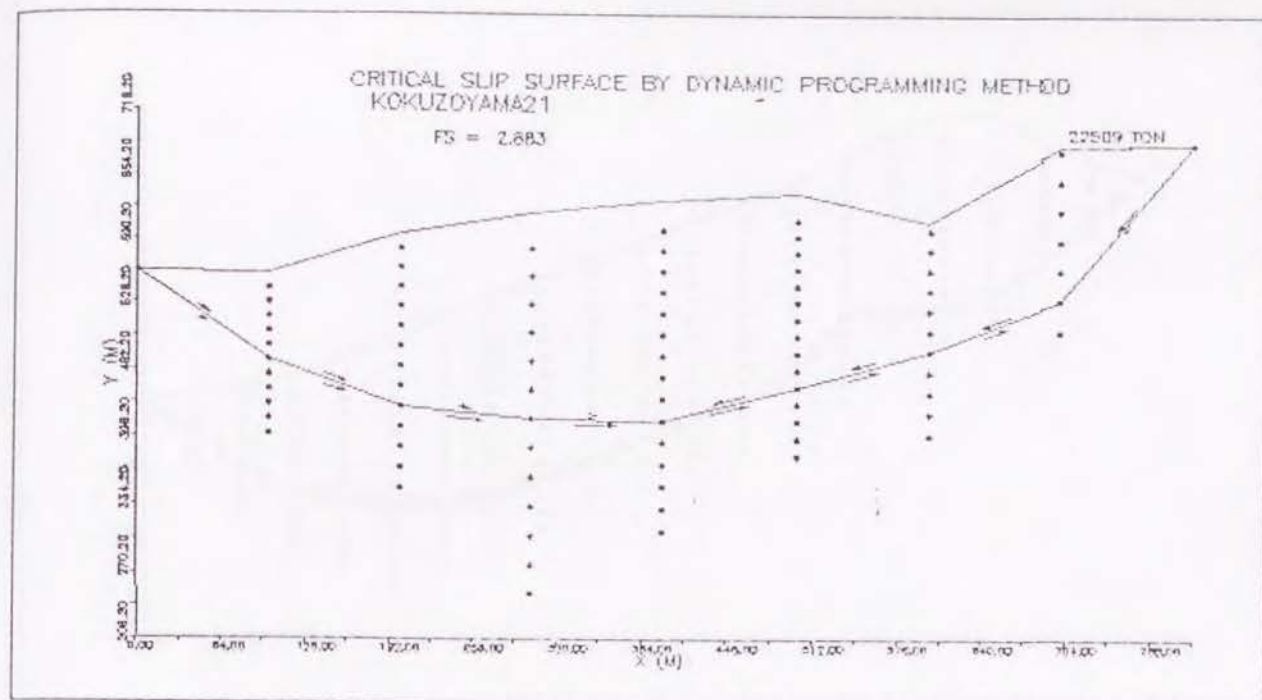
CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
KOKUZUYAMA20

FS = 2.423

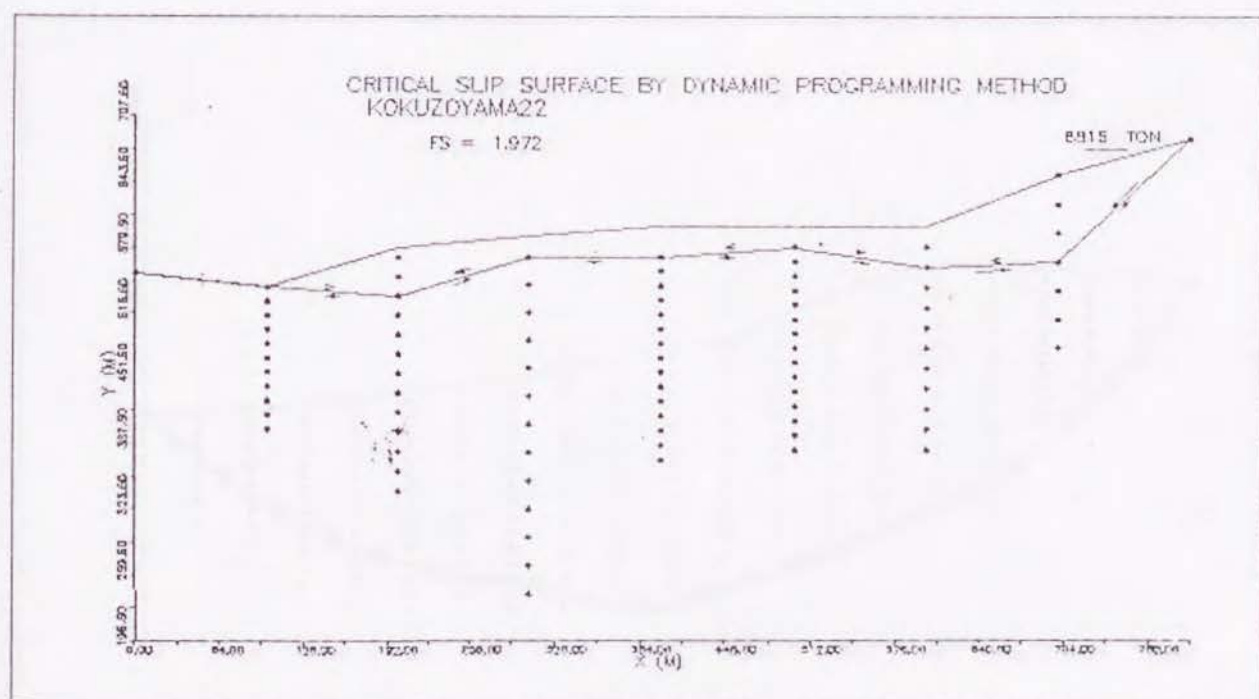
11527 TON



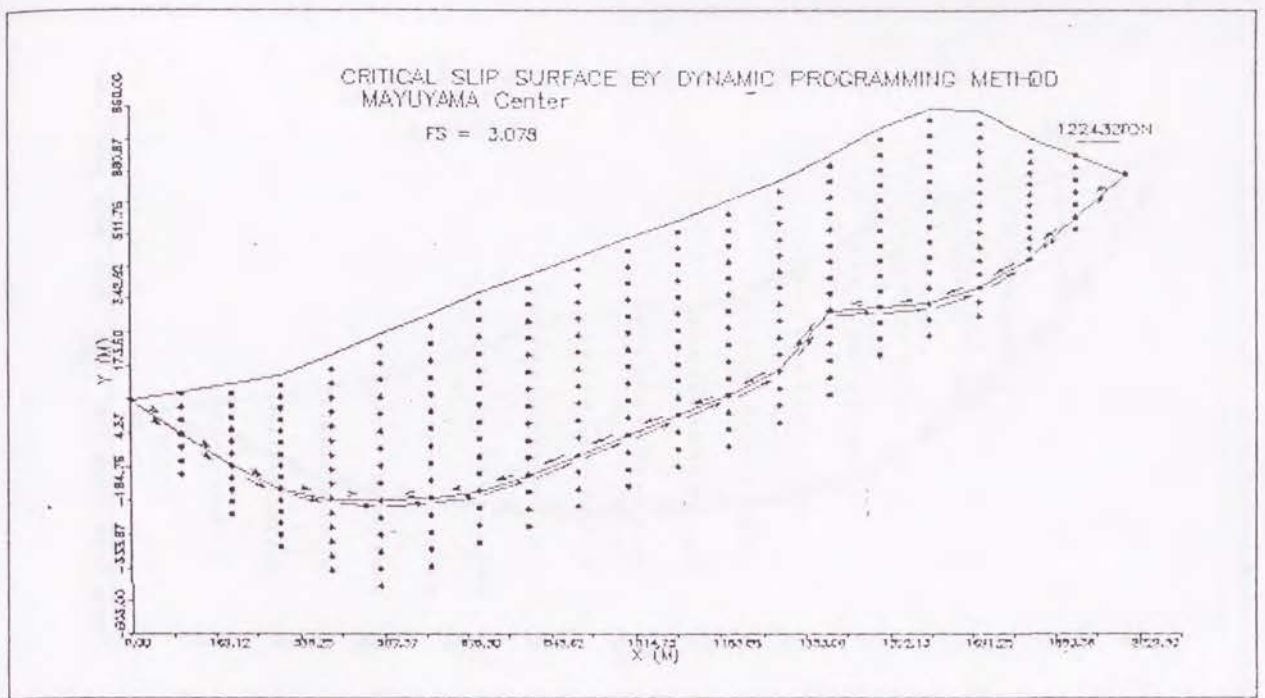
長野県虚空蔵山 測線20 (土質定数 γ 2.7t/m³, C 2.6t/m², ϕ 21.5°)



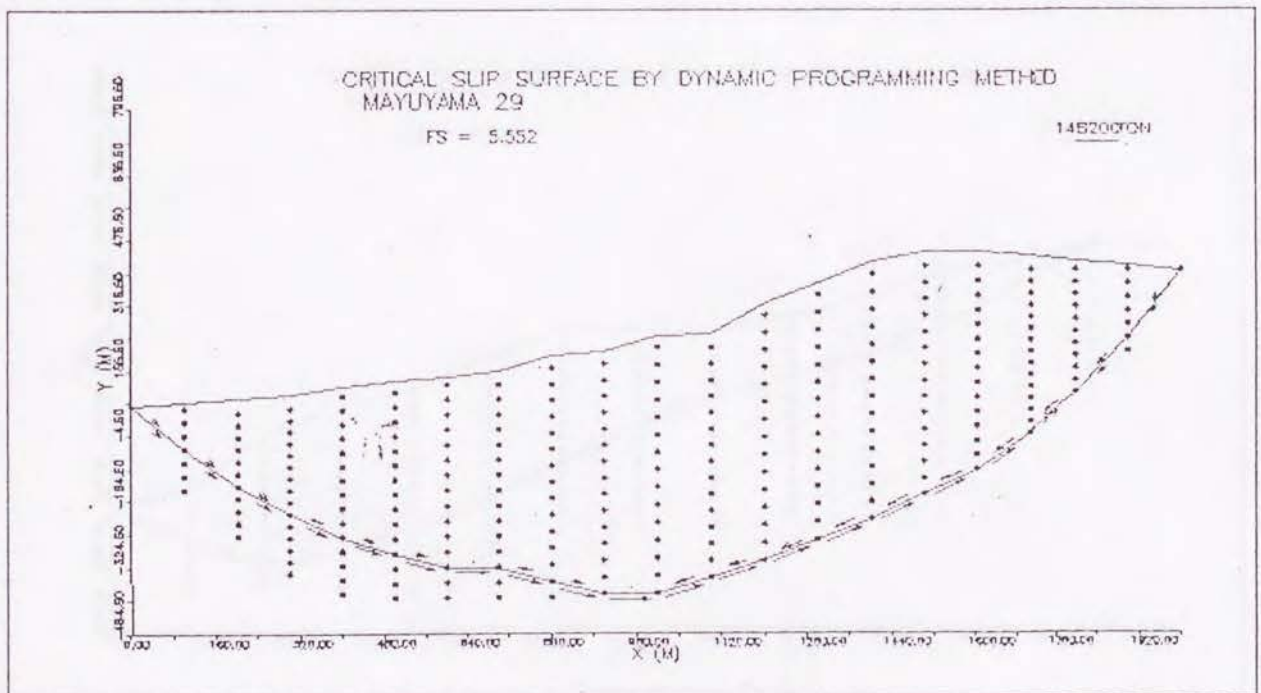
長野県虚空蔵山 測線21 (土質定数 γ 2.7t/m³, C 2.6t/m², ϕ 21.5°)



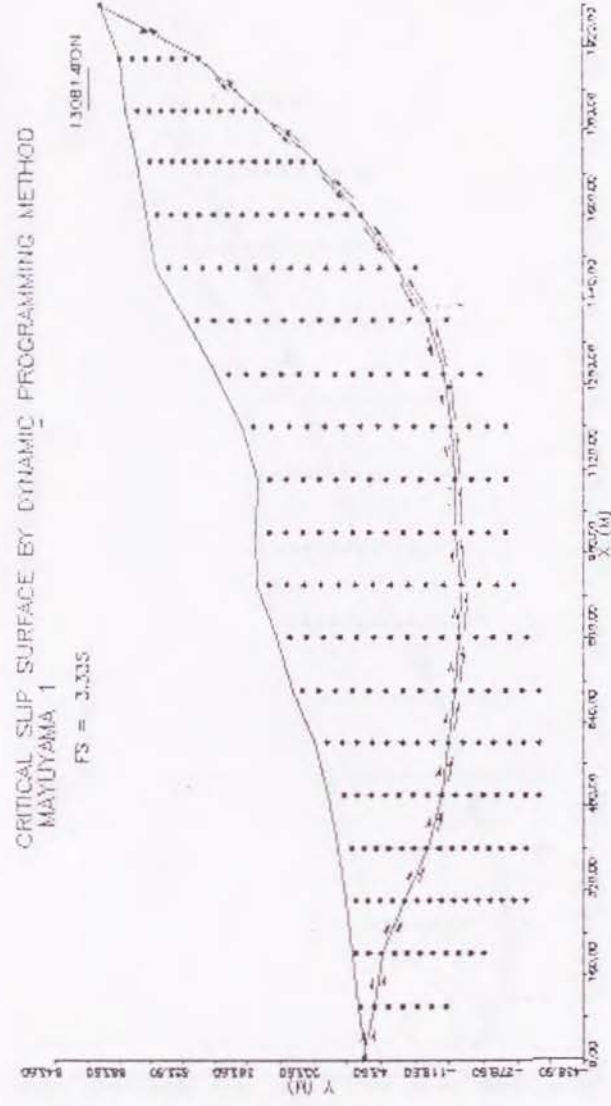
長野県虚空蔵山 測線22 (土質定数 γ 2.7t/m³, C 2.6t/m², ϕ 21.5°)



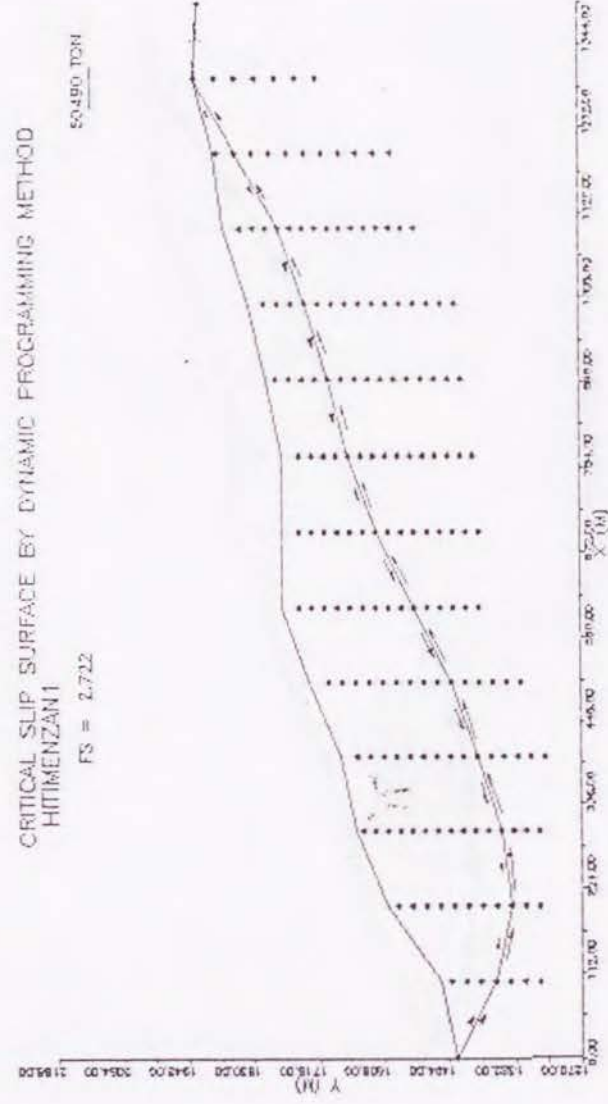
長崎県眉山 測線センター (土質定数 γ 2.7t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)



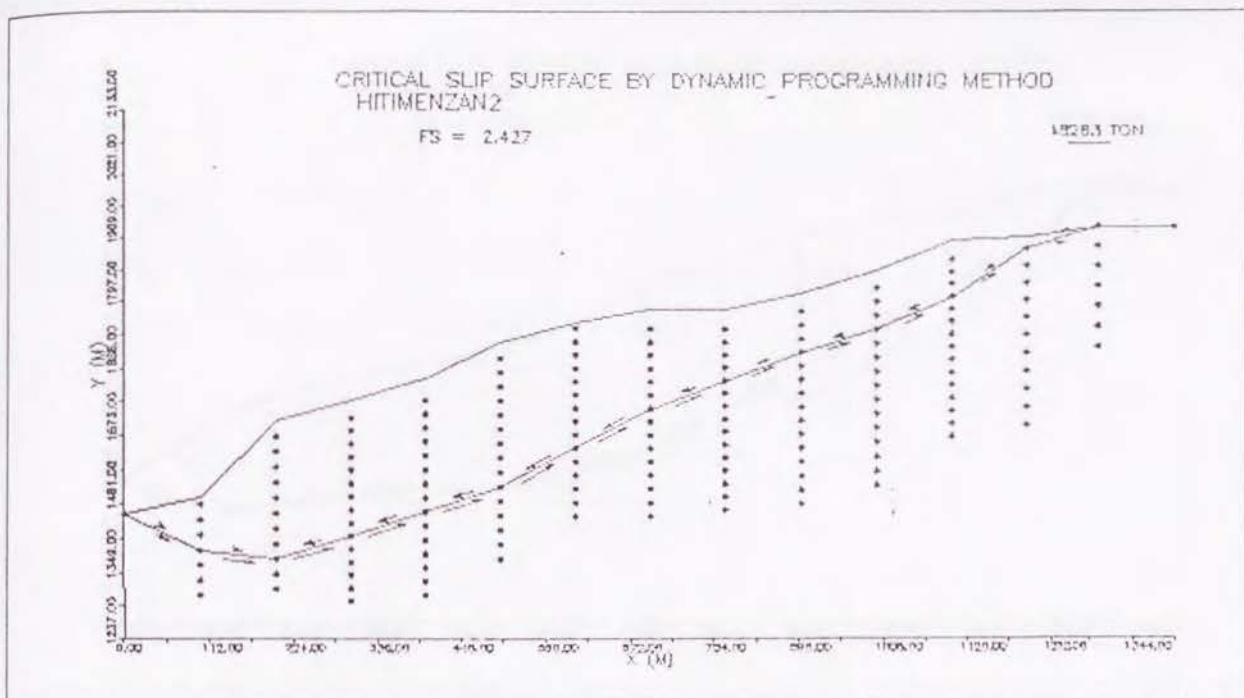
長崎県眉山 測線29 (土質定数 γ 2.7t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)



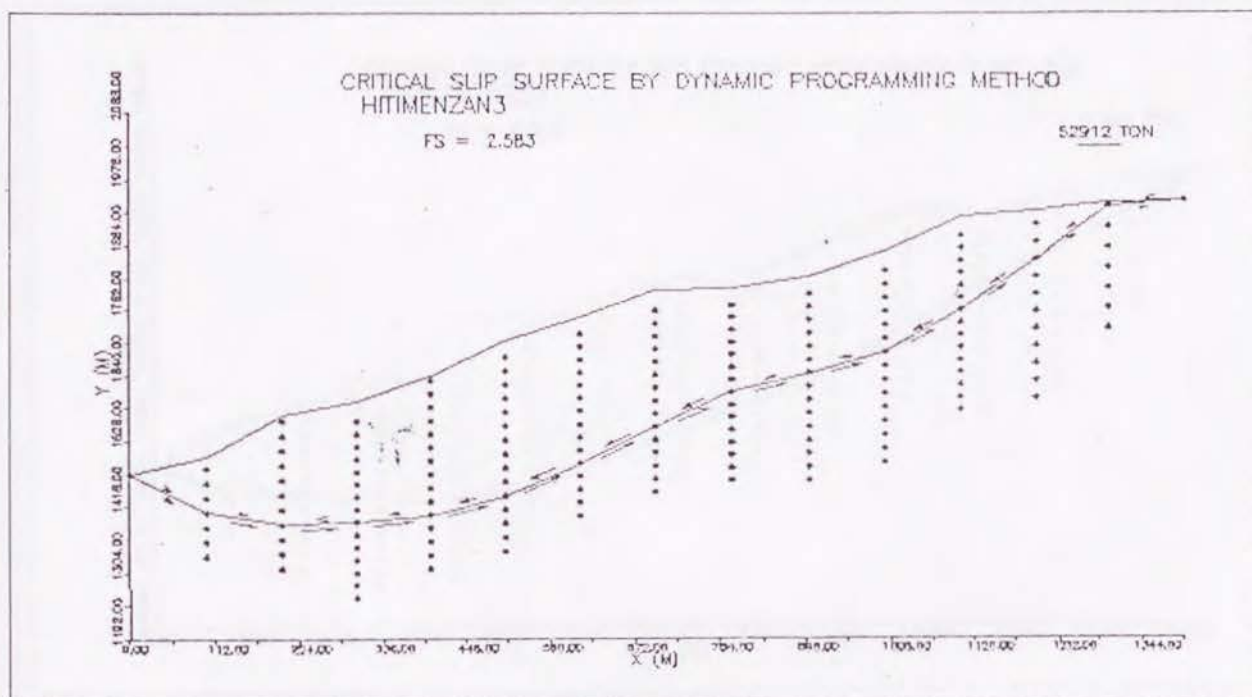
長崎県眉山 測線 1 (土質定数 γ 2.7t/m³, C 100.0t/m², ϕ 40.0°)



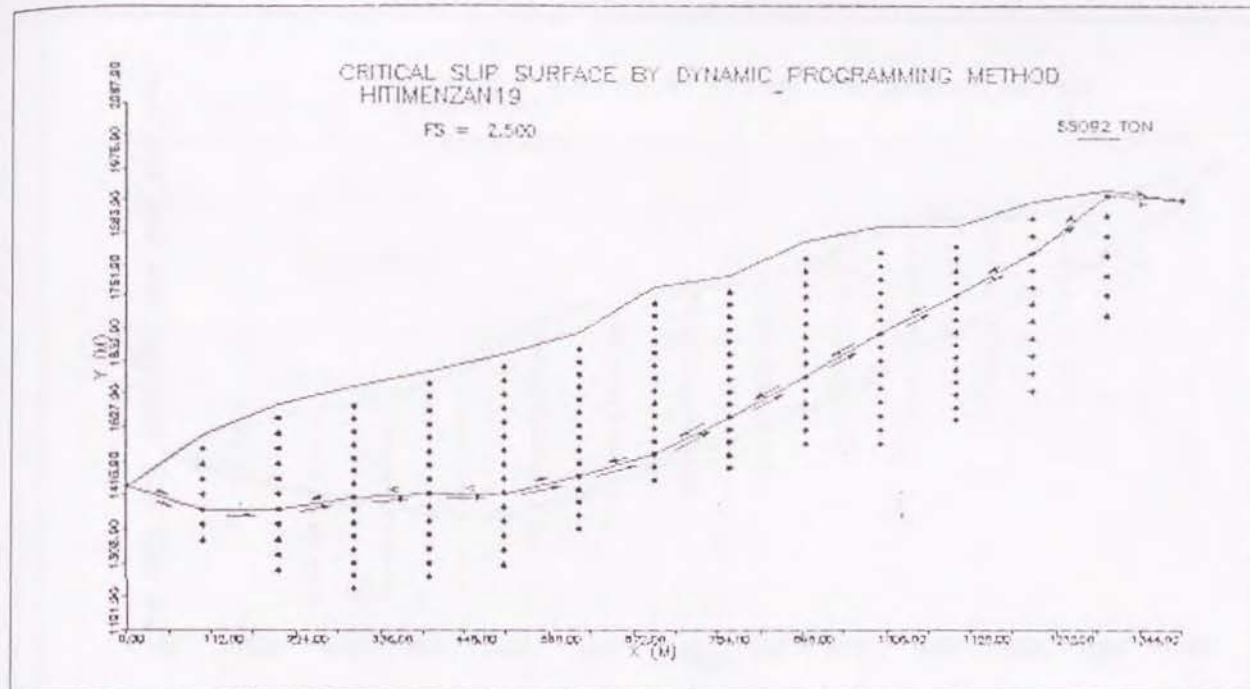
山梨県七面山 測線 1 (土質定数 γ 2.7t/m³, C 75.0t/m², ϕ 35.0°)



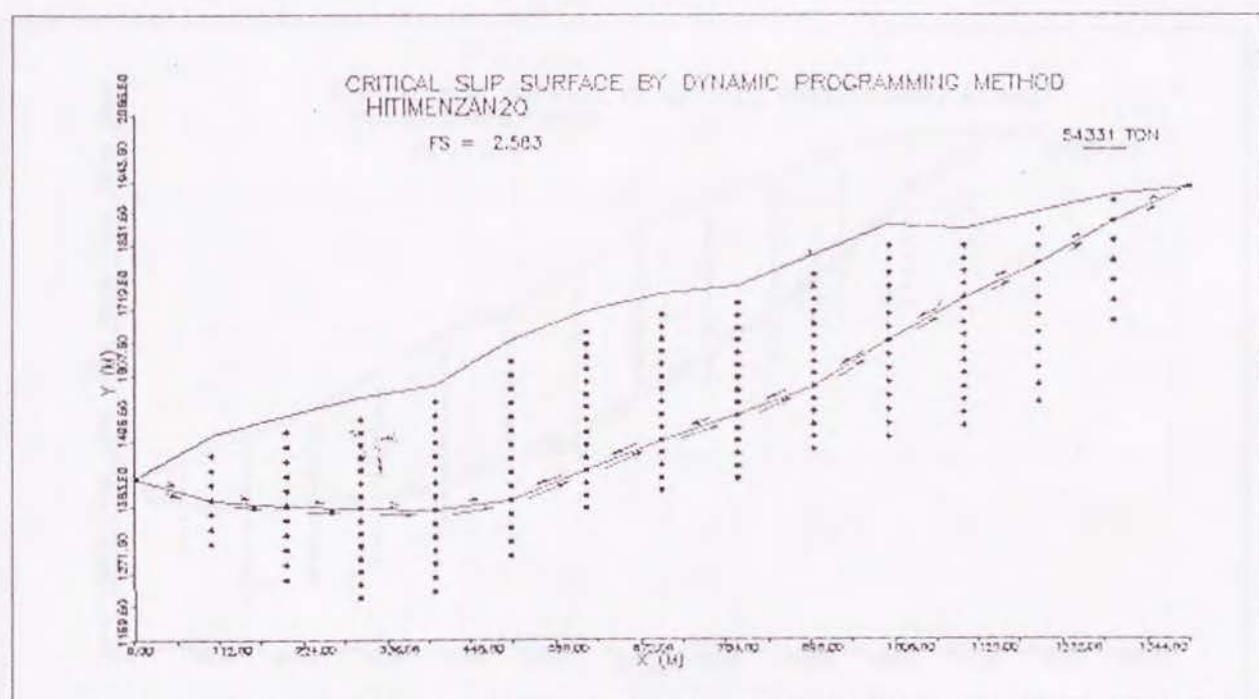
山梨県七面山 測線2 (土質定数 γ 2.7t/m³, C 75.0t/m², ϕ 35.0°)



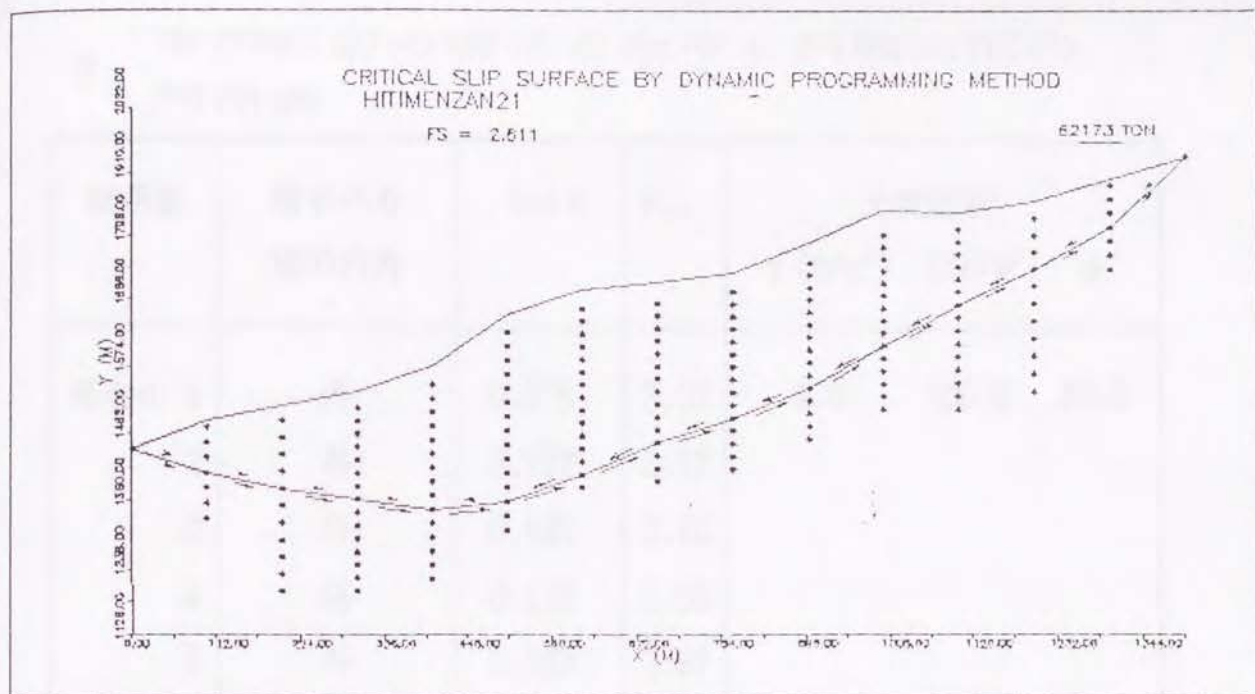
山梨県七面山 測線3 (土質定数 γ 2.7t/m³, C 75.0t/m², ϕ 35.0°)



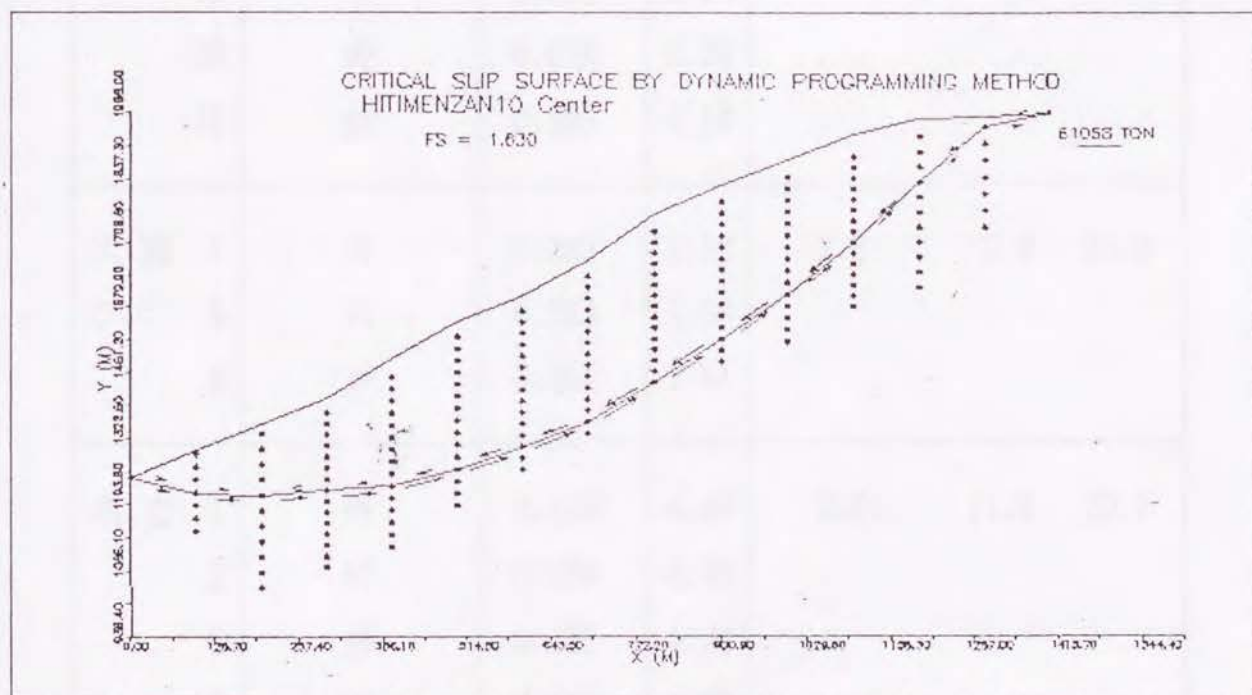
山梨県七面山 測線19 (土質定数 γ 2.7t/m³, C 75.0t/m², ϕ 35.0°)



山梨県七面山 測線20 (土質定数 γ 2.7t/m³, C 75.0t/m², ϕ 35.0°)



山梨県七面山 測線21 (土質定数 γ 2.7t/m³, C 75.0t/m², ϕ 35.0°)



山梨県七面山 測線センター (土質定数 γ 2.7t/m³, C 75.0t/m², ϕ 35.0°)

2. 事例斜面の現状安全率と斜面勾配の
関係表

箇所名	地すべり 地の内外	$\tan \theta$	F_{sp}	土質定数		
				γ (t/m ³)	C (t/m ²)	ϕ°
葛老山 C	1 外	0.075	3.02	2.6	100.0	40.0
	2 外	0.102	3.17			
	3 外	0.135	3.15			
	4 外	0.176	3.05			
	5 外	0.162	2.97			
	11 内	0.135	2.28			
	14 外	0.073	2.85			
	15 外	0.044	2.80			
	16 外	0.136	3.00			
	17 外	0.103	3.37			
	18 外	0.067	4.38			
	19 外	0.095	5.23			
	20 外	0.078	5.38			
	21 外	0.103	4.38			
大 薮 C	1 外	0.367	1.52	2.6	5.0	30.0
	5 内	0.363	1.58			
	8 外	0.351	1.41			
名 立 C	1 外	0.127	4.49	2.64	11.9	29.7
	2 外	0.128	4.45			
	3 外	0.133	4.21			
	14 内	0.411	1.74			

C : 中央縦断斜面 外 : 地すべり地外、内 : 地すべり地内斜面

箇所名	地すべりの内外	$\tan \theta$	F_{sp}	土質定数 γ (t/m ³) c (t/m ²) ϕ°		
名立 21	外	0.262	4.80	2.64	11.9	29.7
22	外	0.267	4.64			
23	外	0.200	5.23			
24	外	0.160	7.84			
25	外	0.198	7.08			
虚空蔵 1	外	-0.025	4.88	2.7	2.6	21.5
山 3	外	-0.015	8.59			
4	外	0.014	8.69			
5	外	0.075	8.69			
6	外	0.094	7.66			
C 11	内	0.259	1.22			
20	外	0.166	2.42			
21	外	0.164	2.88			
22		0.164	1.97			
七面山 1	外	0.315	2.72	2.7	75.0	35.0
2	外	0.345	2.43			
3	外	0.336	2.58			
C 10	内	0.515	1.63			
19	外	0.354	2.50			
20	外	0.361	2.58			
21	外	0.361	2.61			

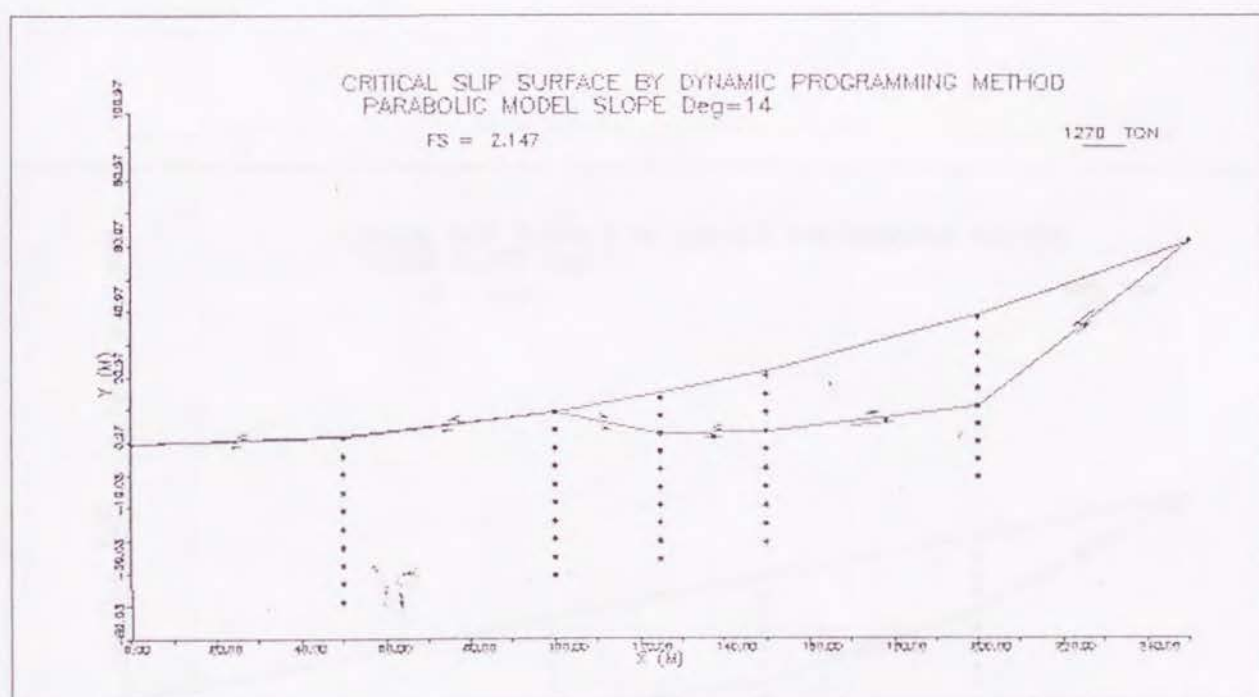
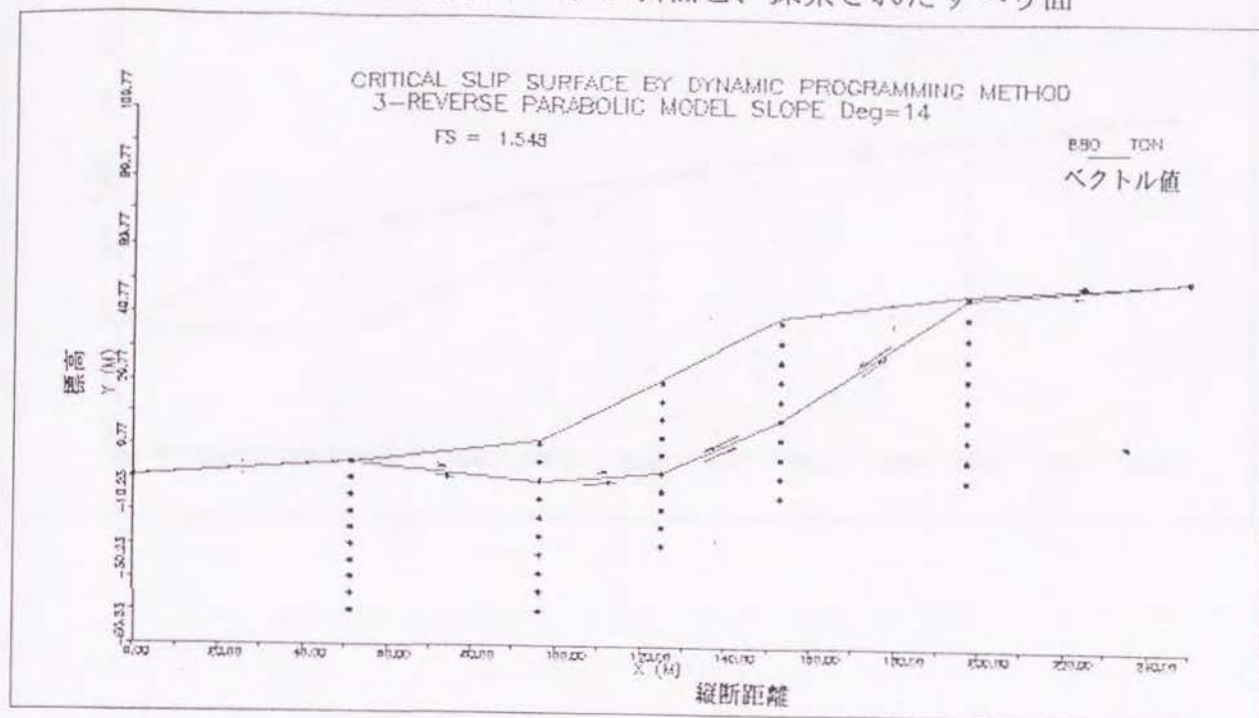
C：中央縦断斜面 外：地すべり地外、内：地すべり地内斜面

箇所名	地すべりの内外	$\tan \theta$	F_{sp}	土質定数		
				γ (t/m ³)	C (t/m ²)	ϕ°
眉山 1	外	0.329	3.34	2.7	100.0	40.0
C 16	内	0.298	3.08			
29	外	0.168	5.55			
御岳崩れ	内	0.528	1.21	1.8	8.7	29.0
松越崩れ	内	0.484	1.28	1.66	4.53	18.3
怒田地すべり	内	0.387	1.29	2.29	1.55	17.6
八畝地すべり	内	0.591	1.31	2.29	1.55	17.6
いわき地すべり	内	0.387	1.10	不明 (簡便ヤンプ法別途計算)		

合計50斜面； 「外」 39斜面、「内」 11斜面。

C：中央縦断斜面 外：地すべり地外、内：地すべり地内斜面

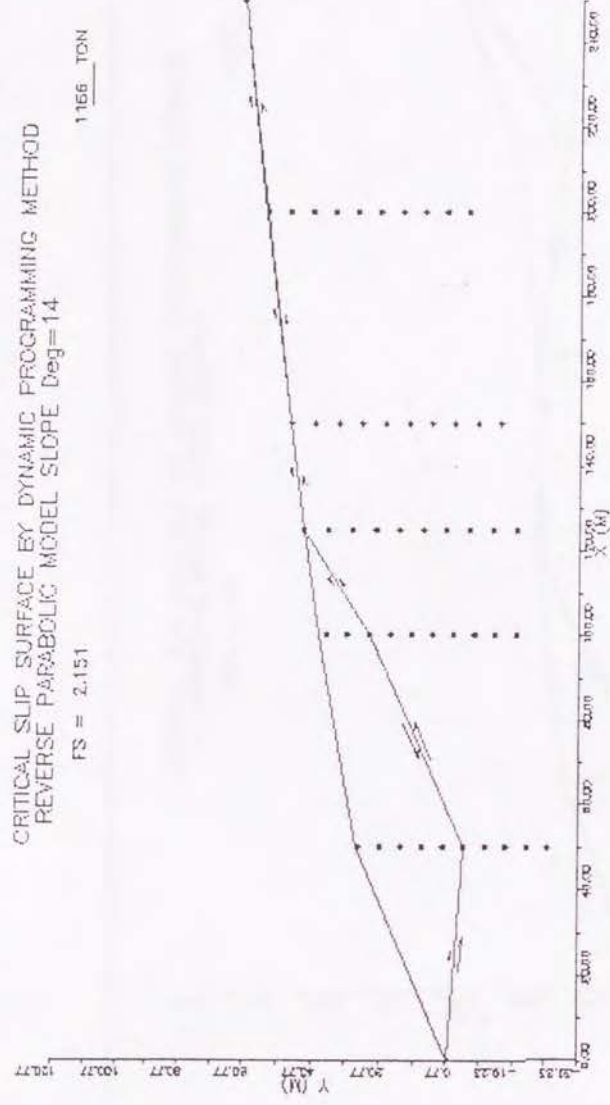
3. 斜面形状別現状安全率計算のモデル斜面と、探索されたすべり面



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
REVERSE PARABOLIC MODEL SLOPE Deg=14

FS = 2.151

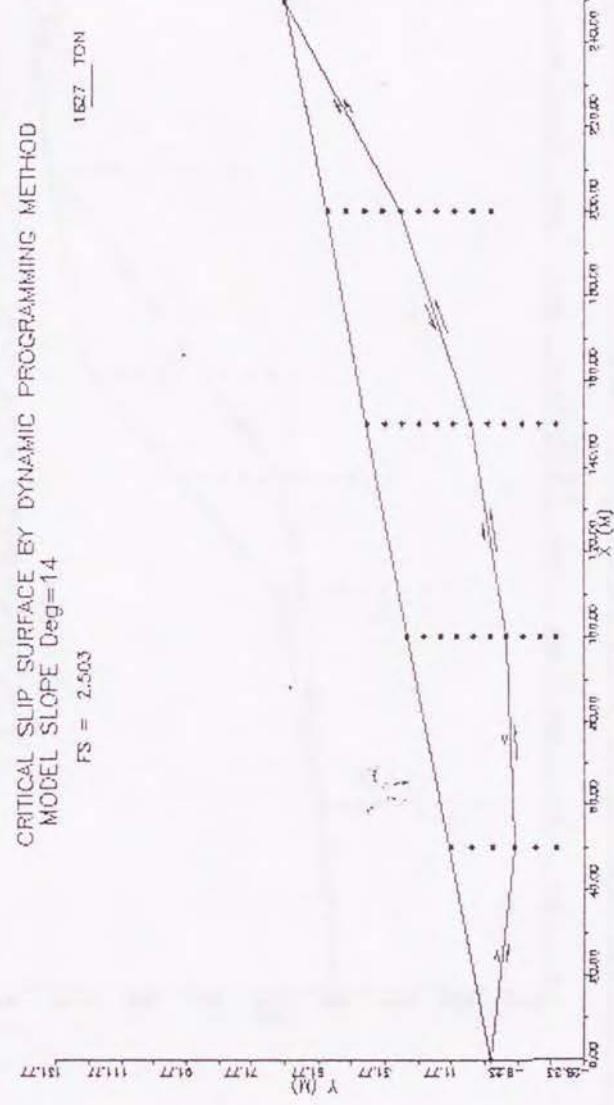
1166 TON

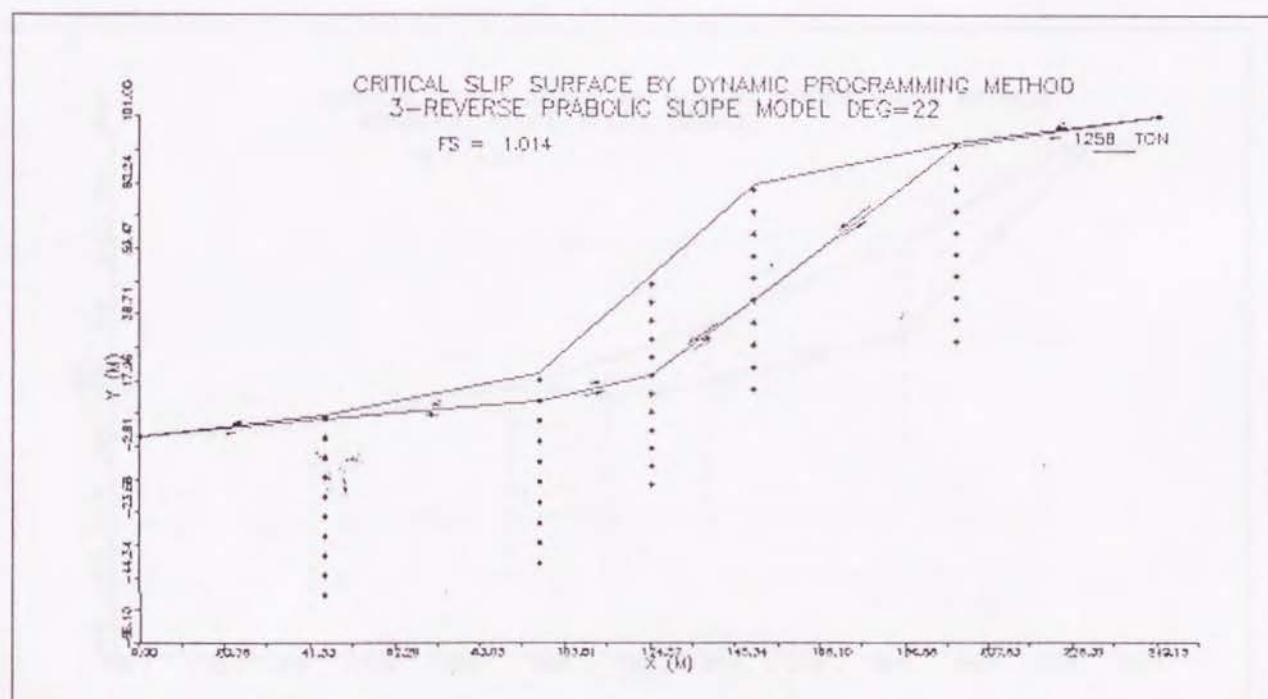
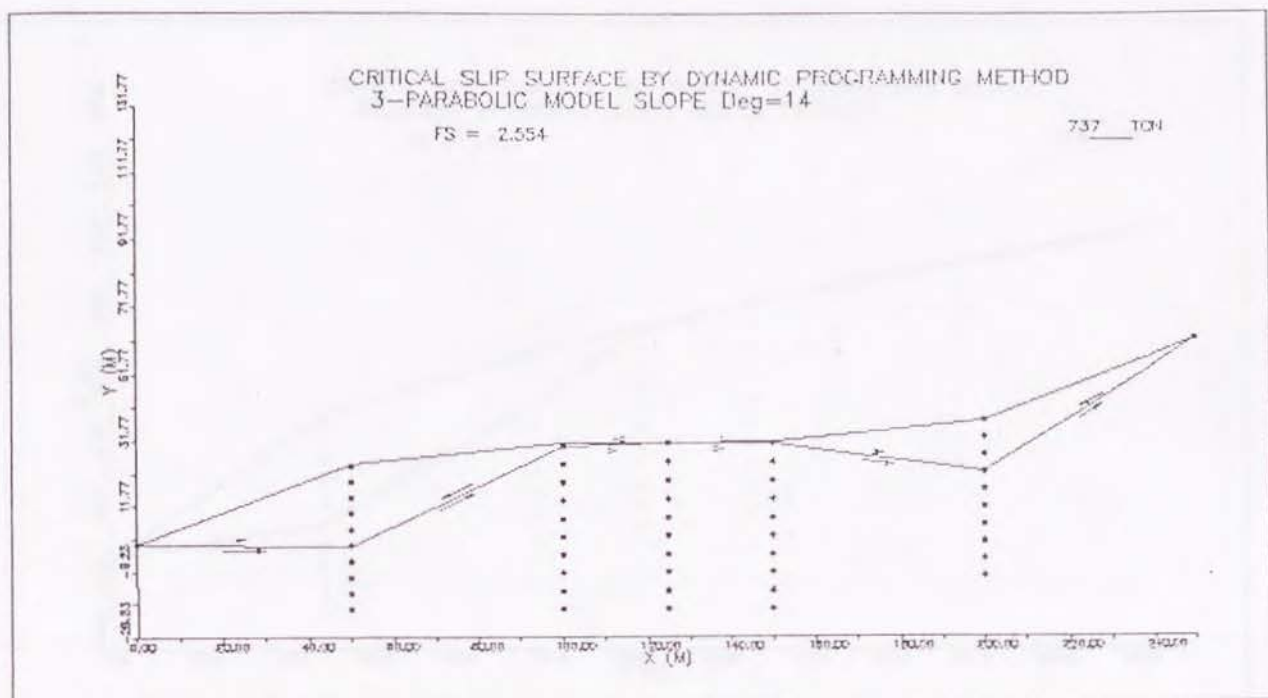


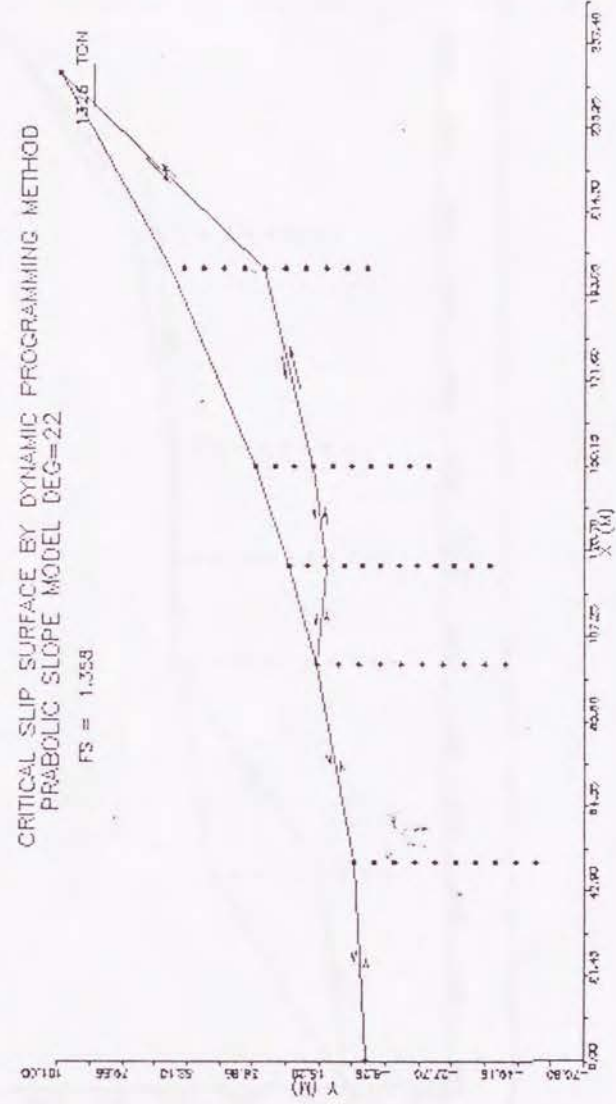
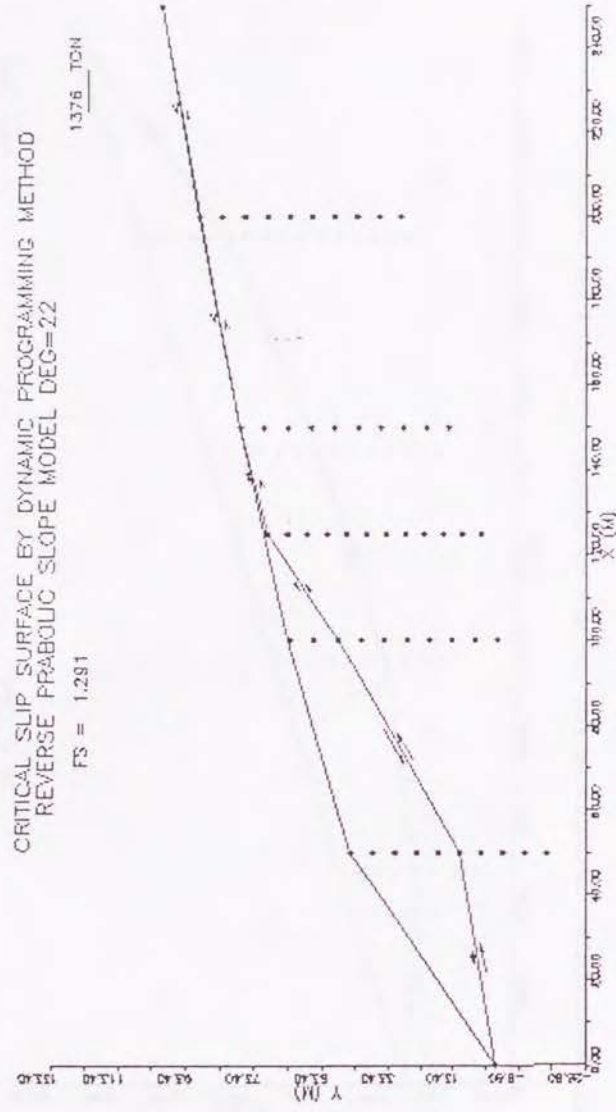
CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
MODEL SLOPE Deg=14

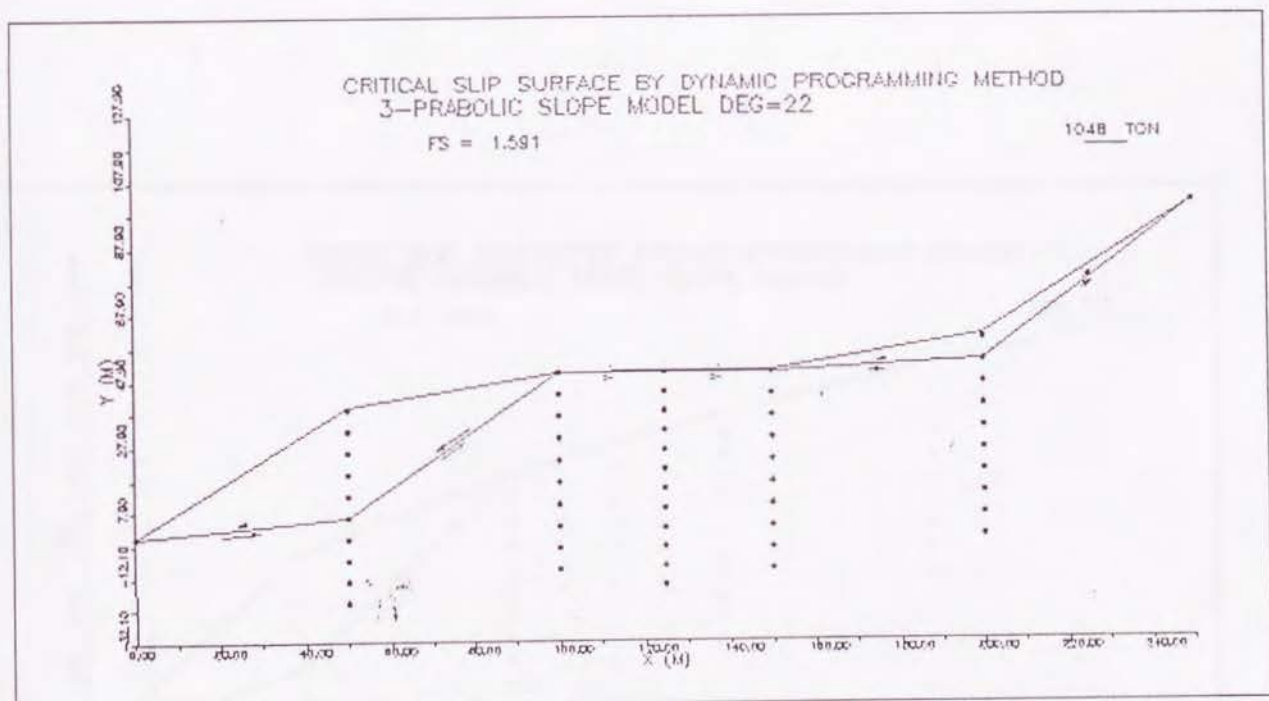
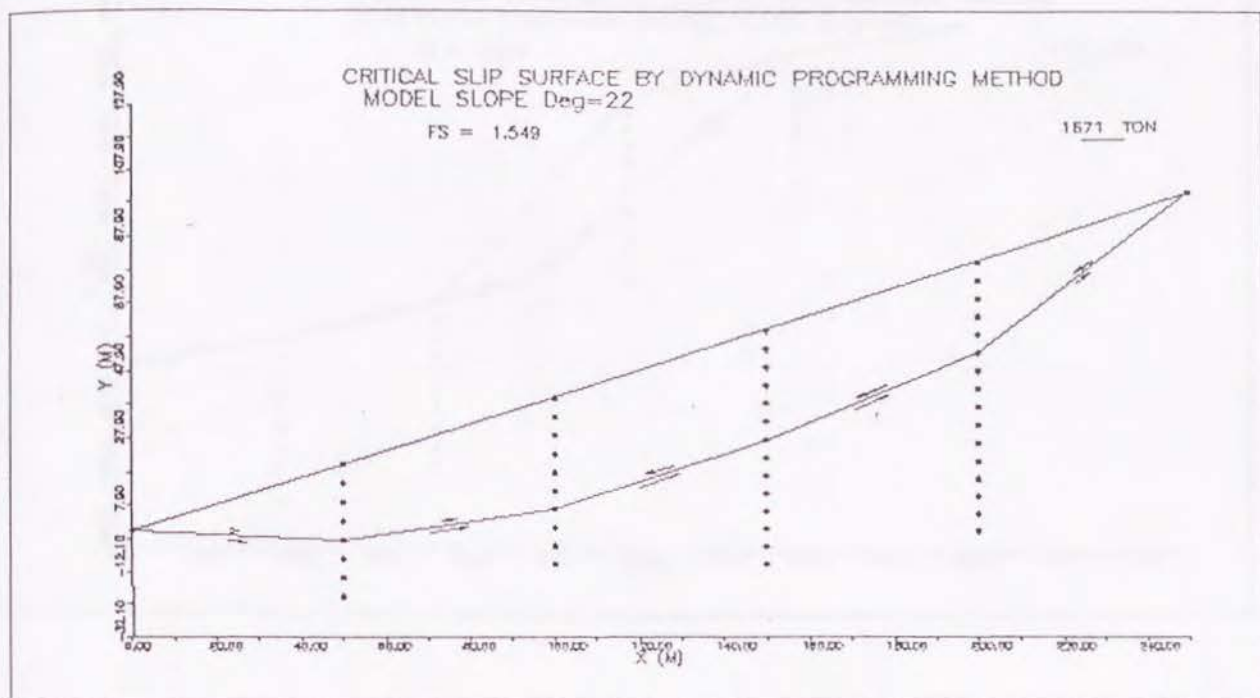
FS = 2.503

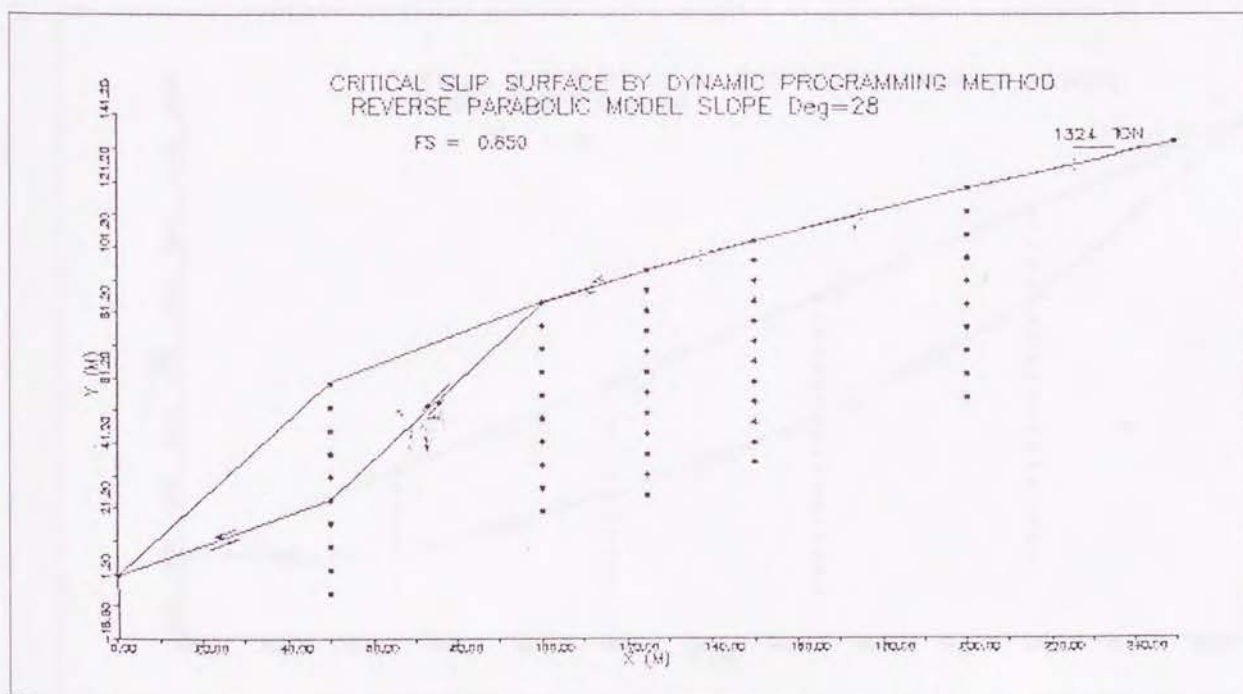
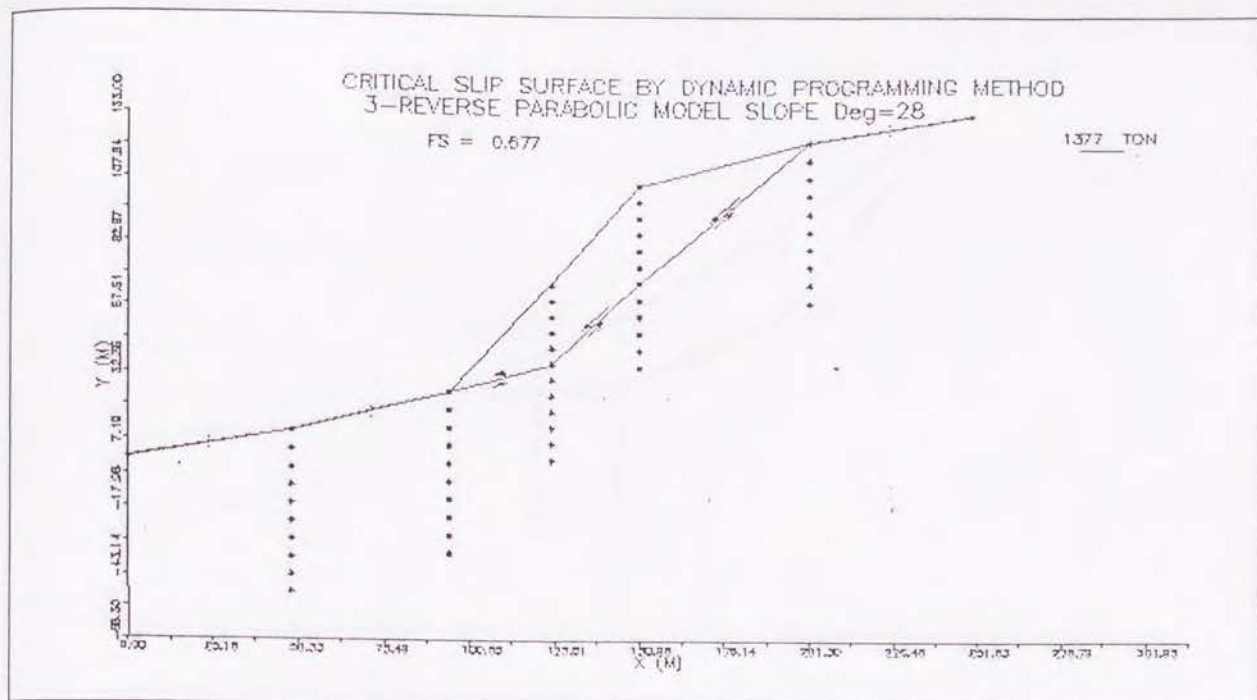
1627 TON

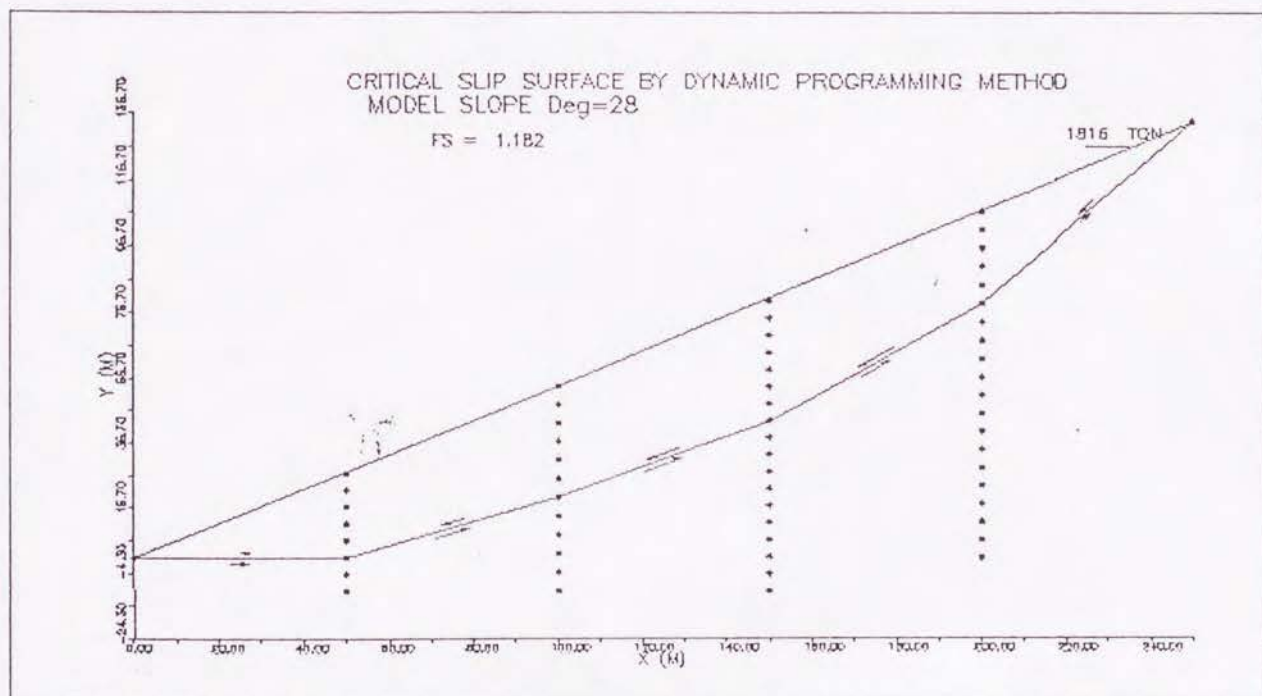
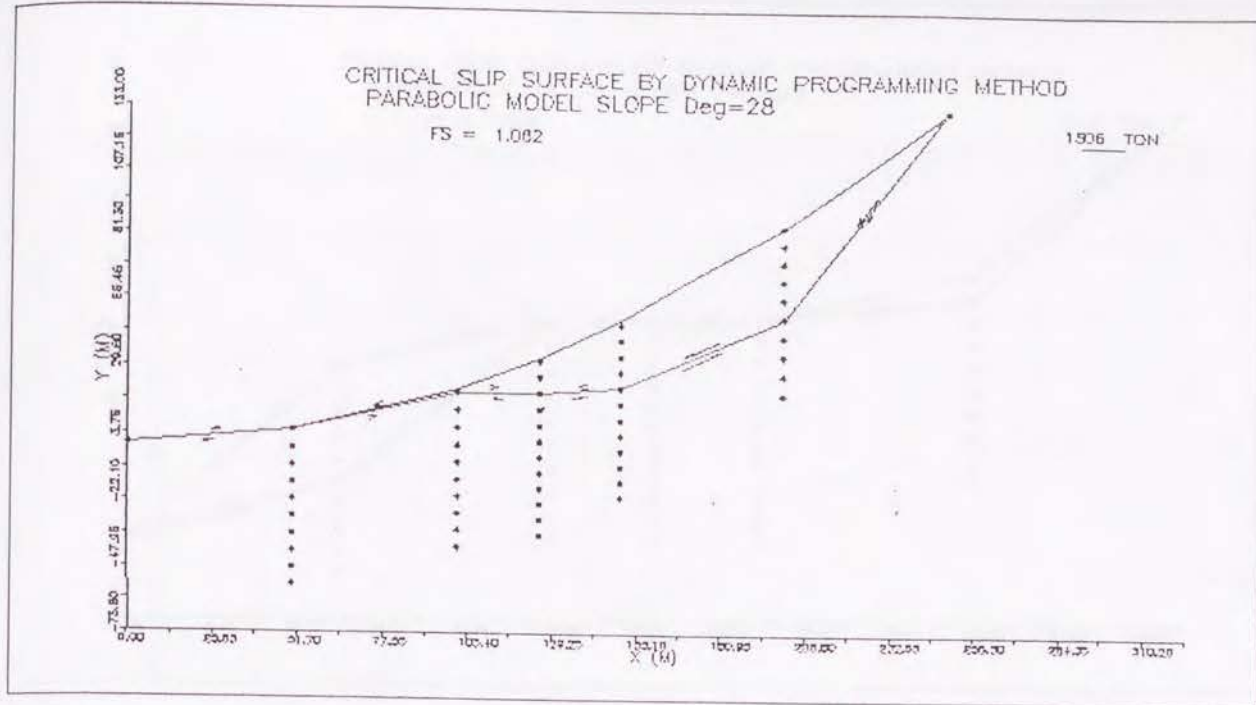








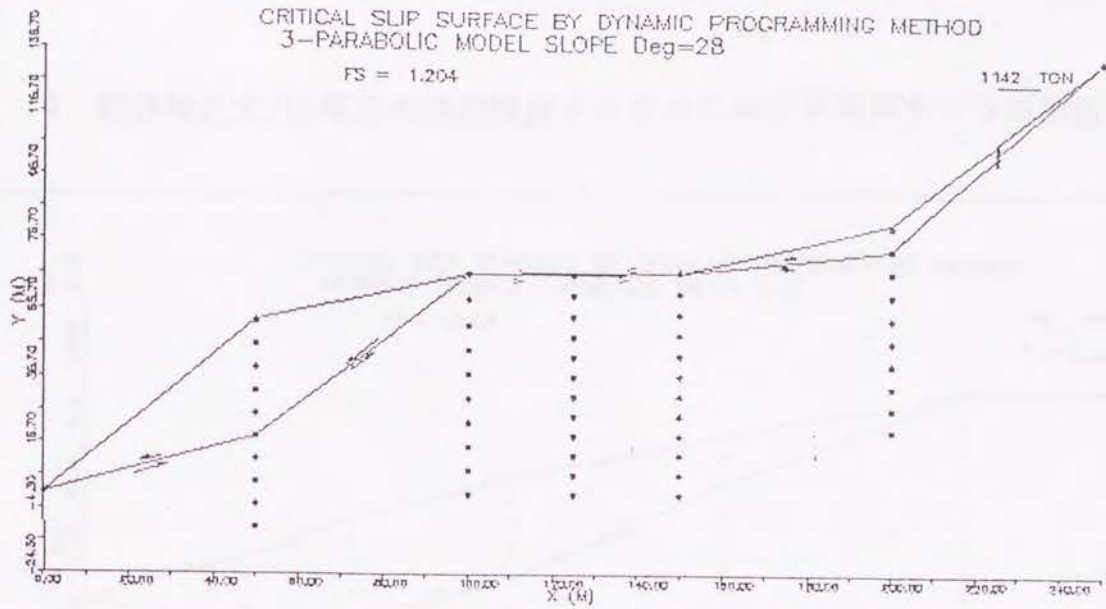




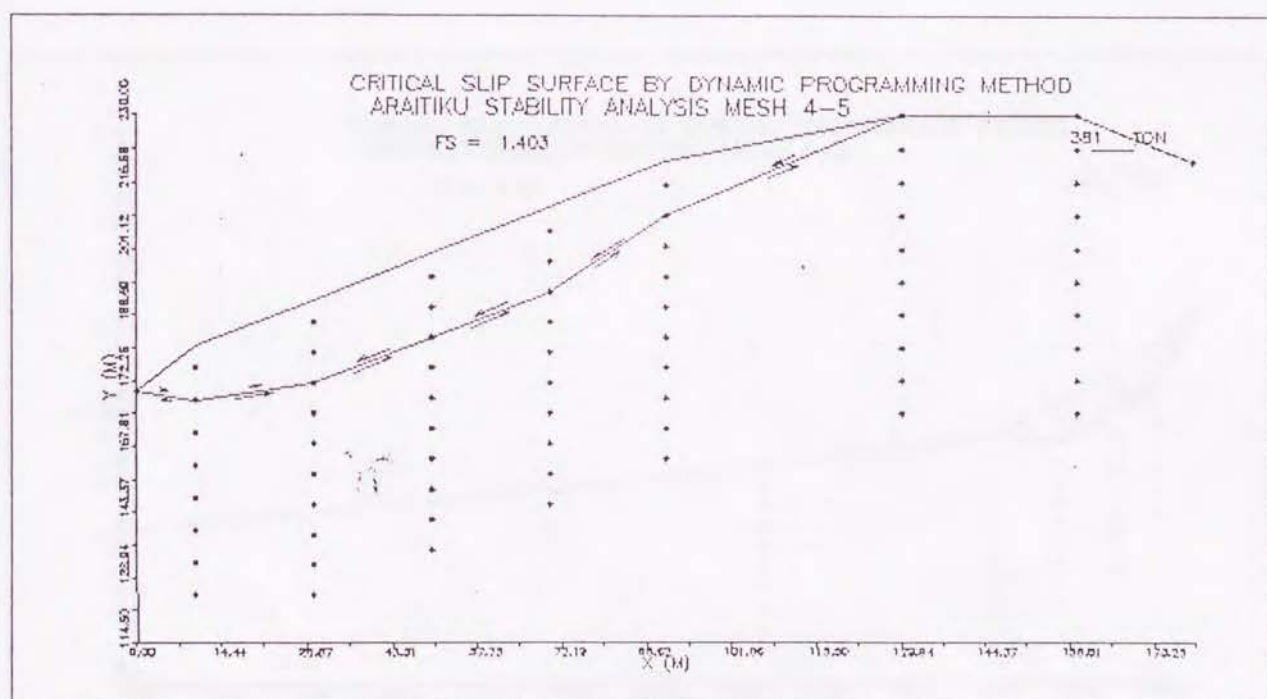
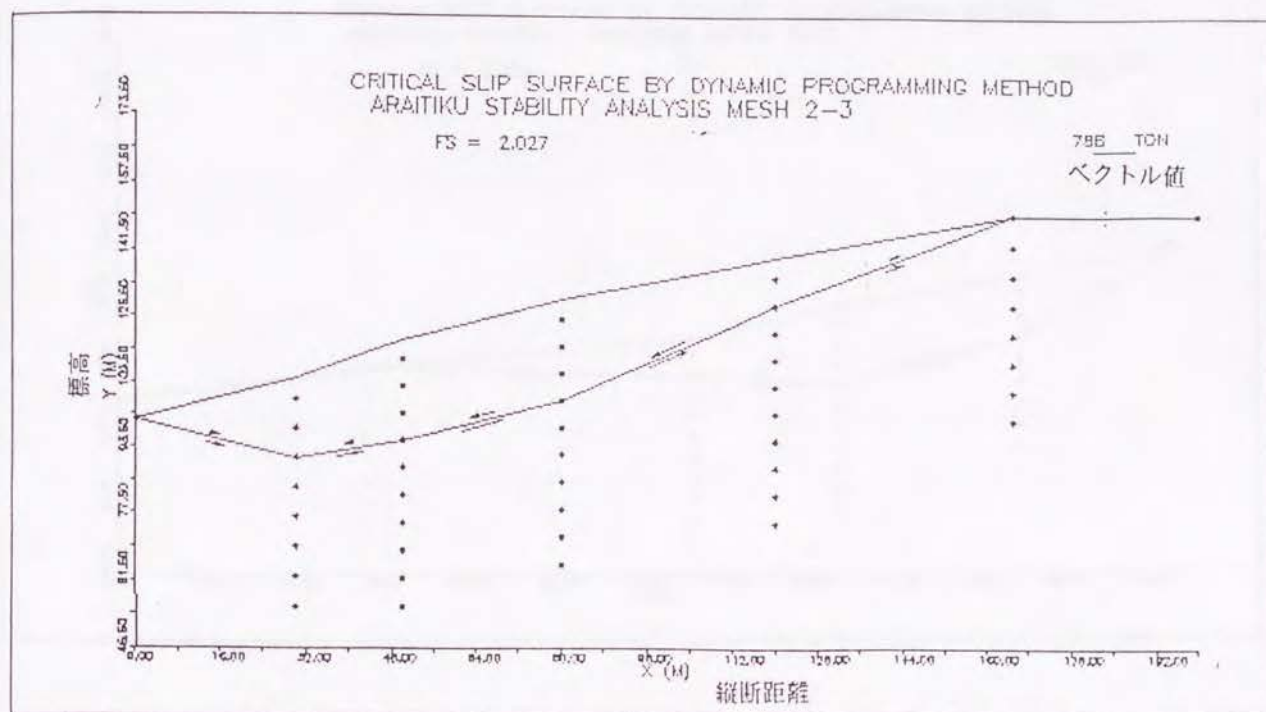
CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
3-PARABOLIC MODEL SLOPE Deg=28

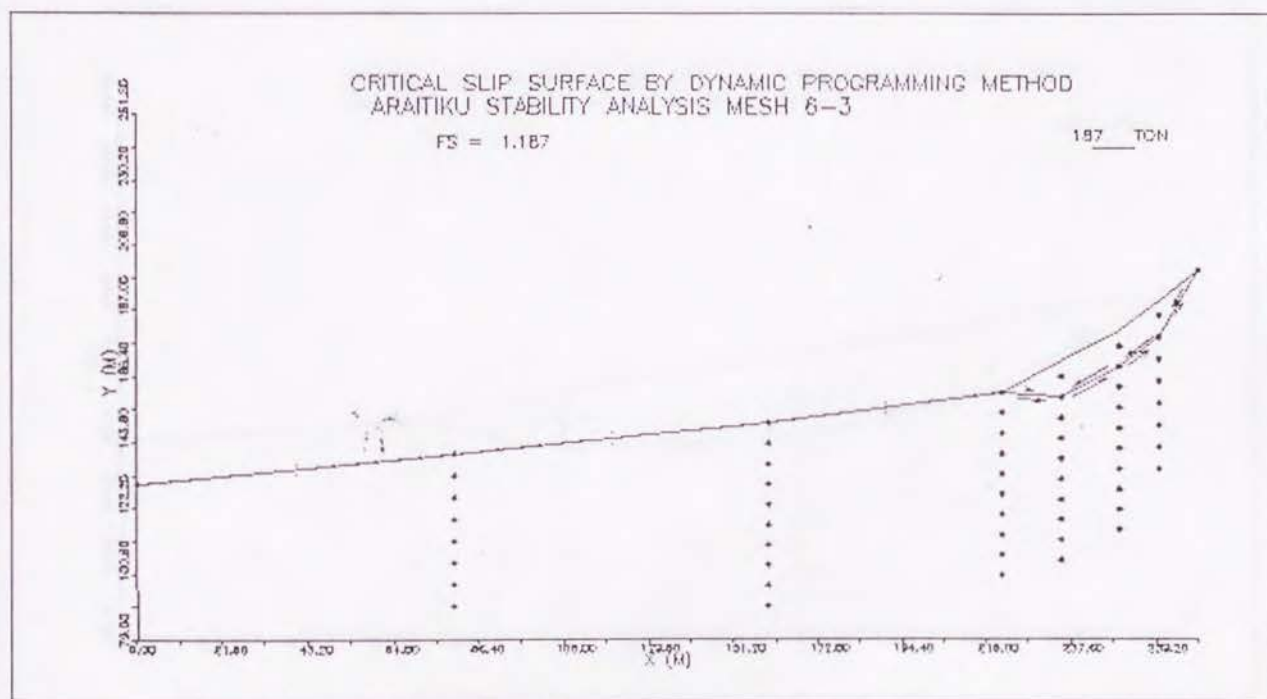
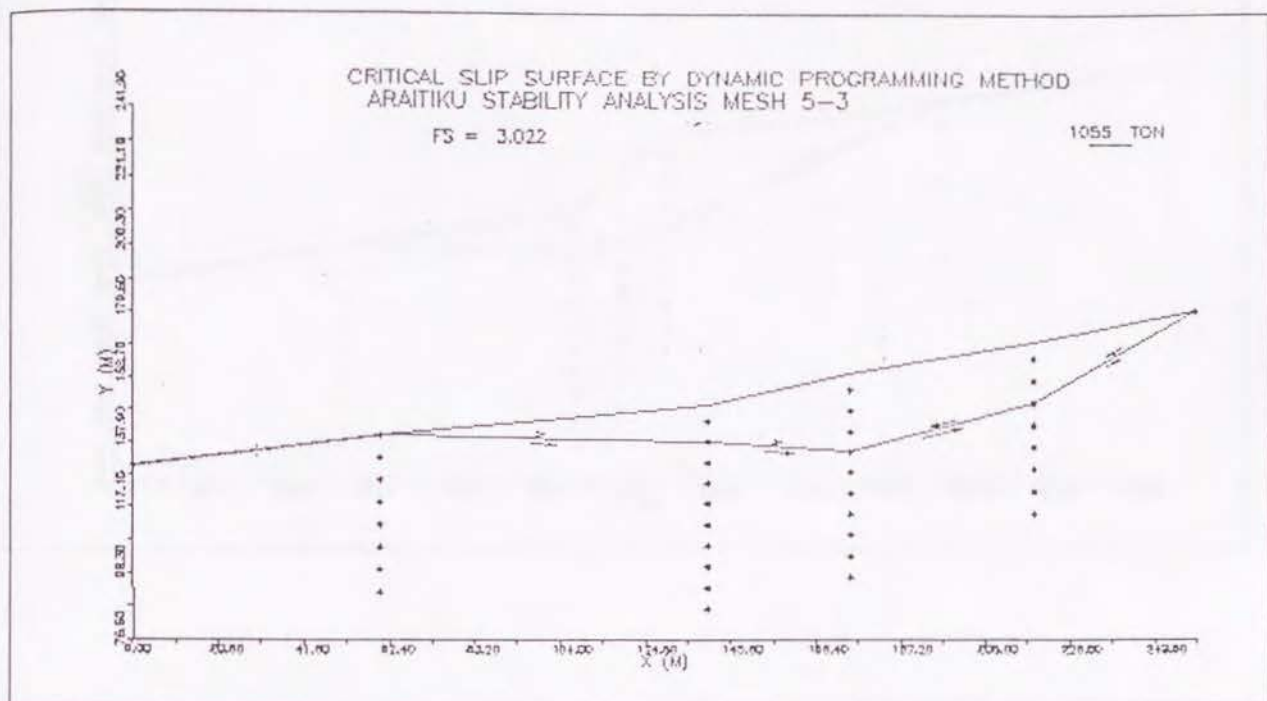
FS = 1.204

1142 TON



4. 新井地区丈ヶ山周辺の高危険度メッシュにおける臨界すべり面解析結果

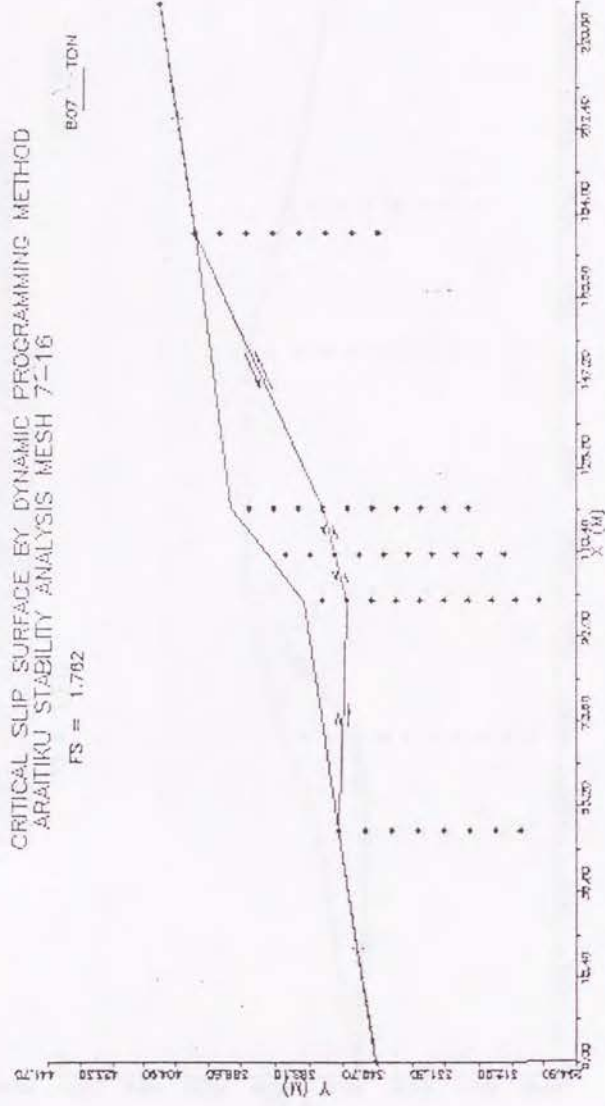




CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKU STABILITY ANALYSIS MESH 7-16

FS = 1.762

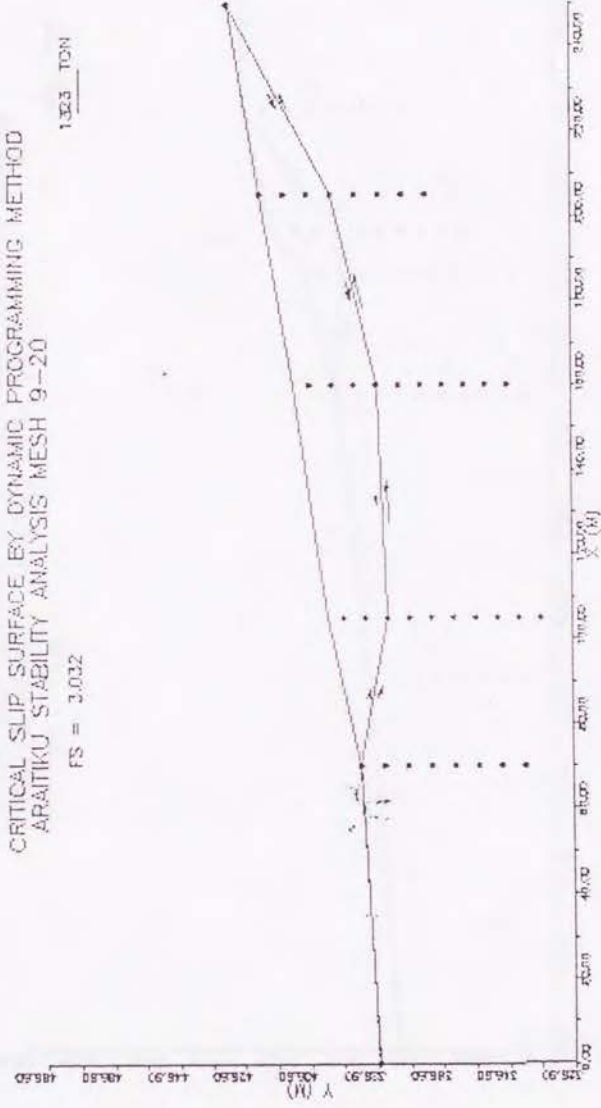
807 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKU STABILITY ANALYSIS MESH 9-20

FS = 3.032

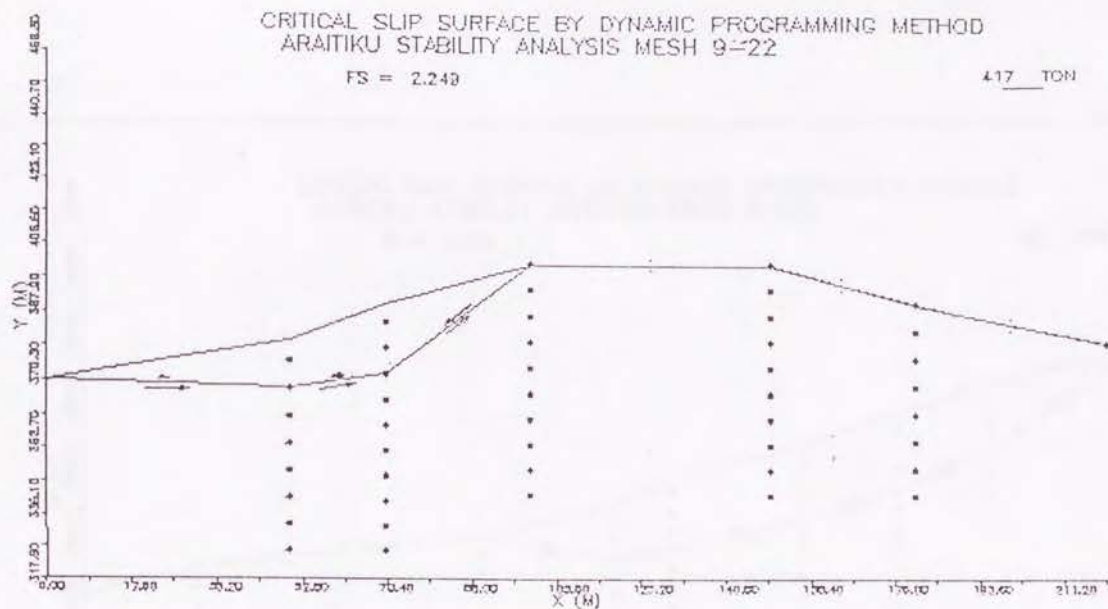
1323 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKU STABILITY ANALYSIS MESH 9-22

FS = 2.249

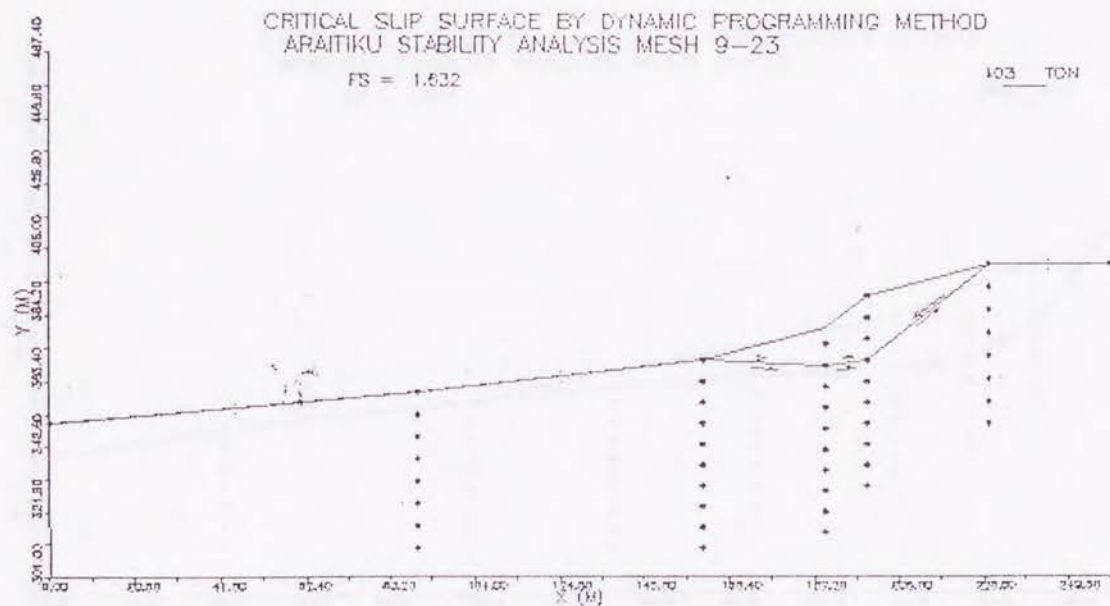
417 TON

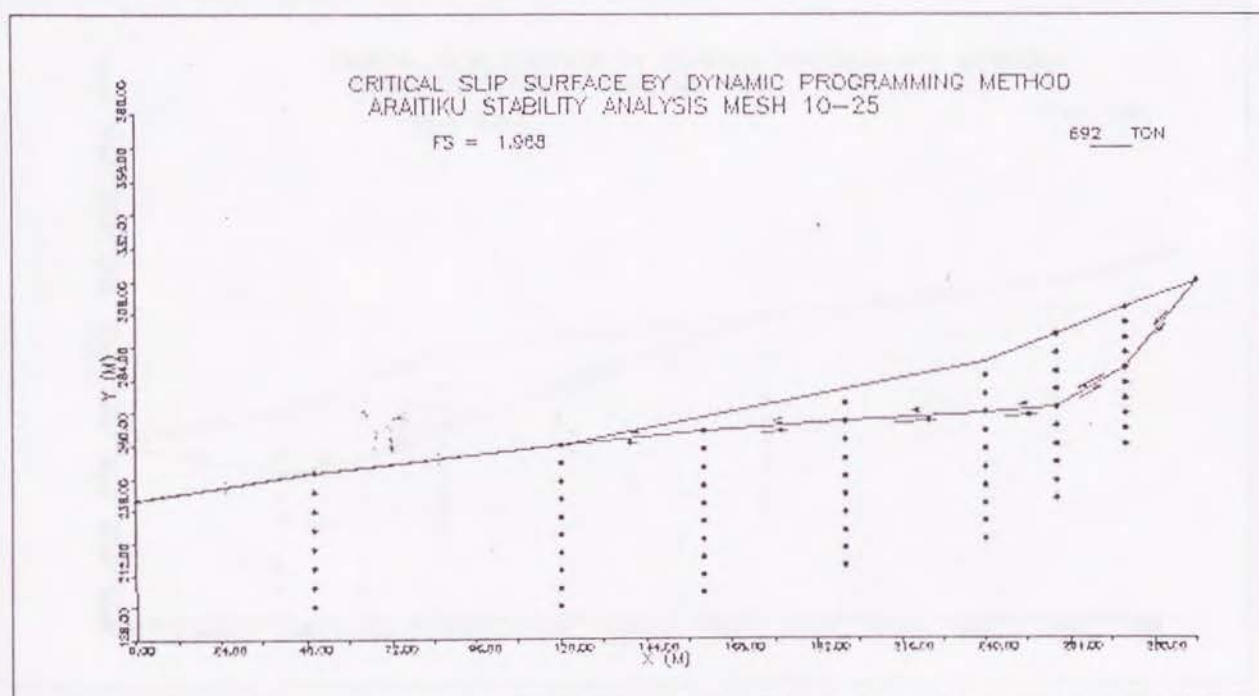
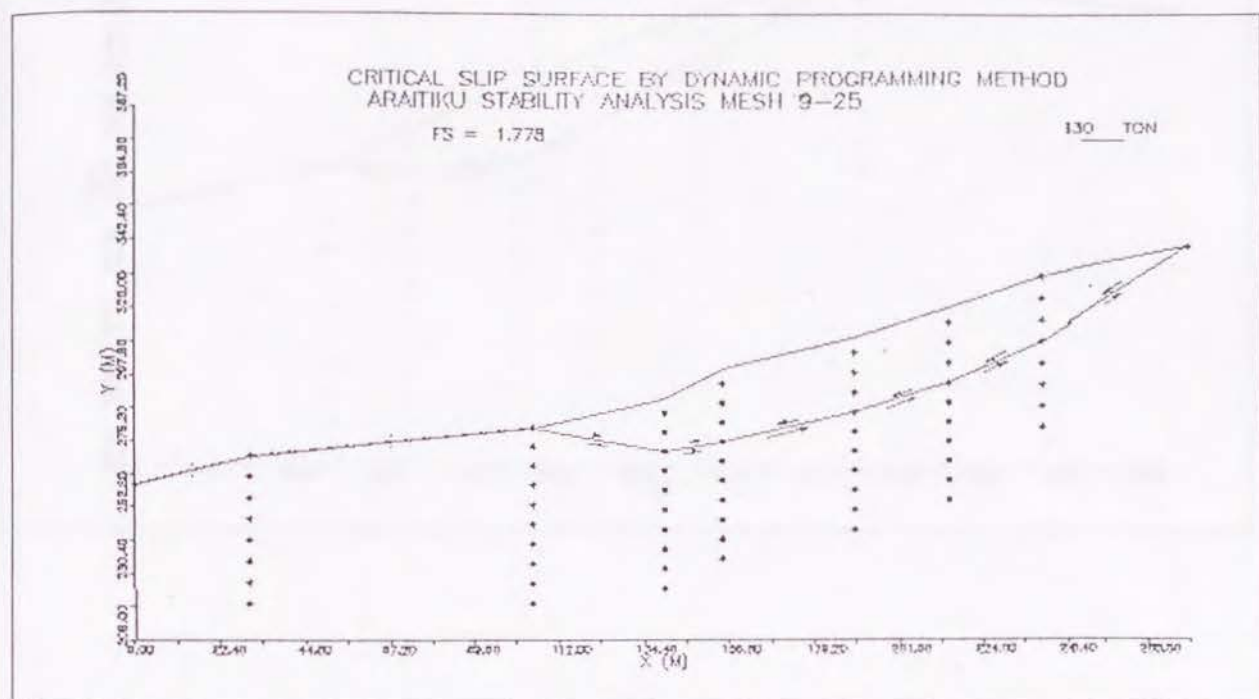


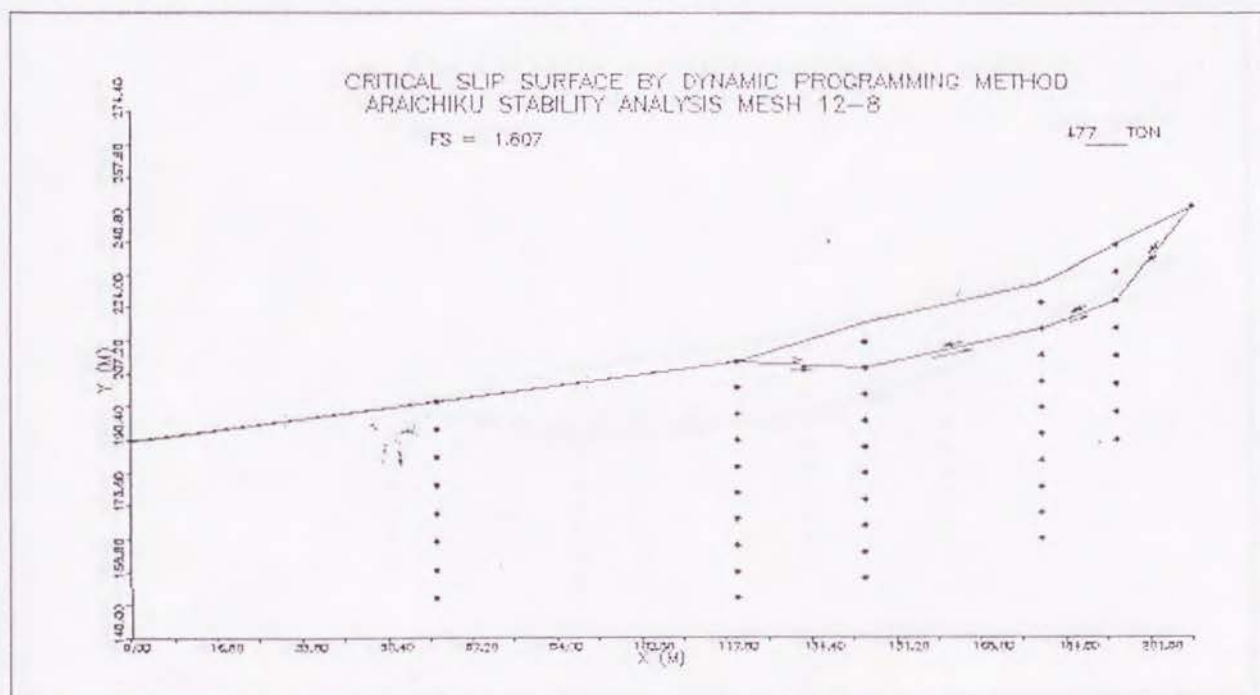
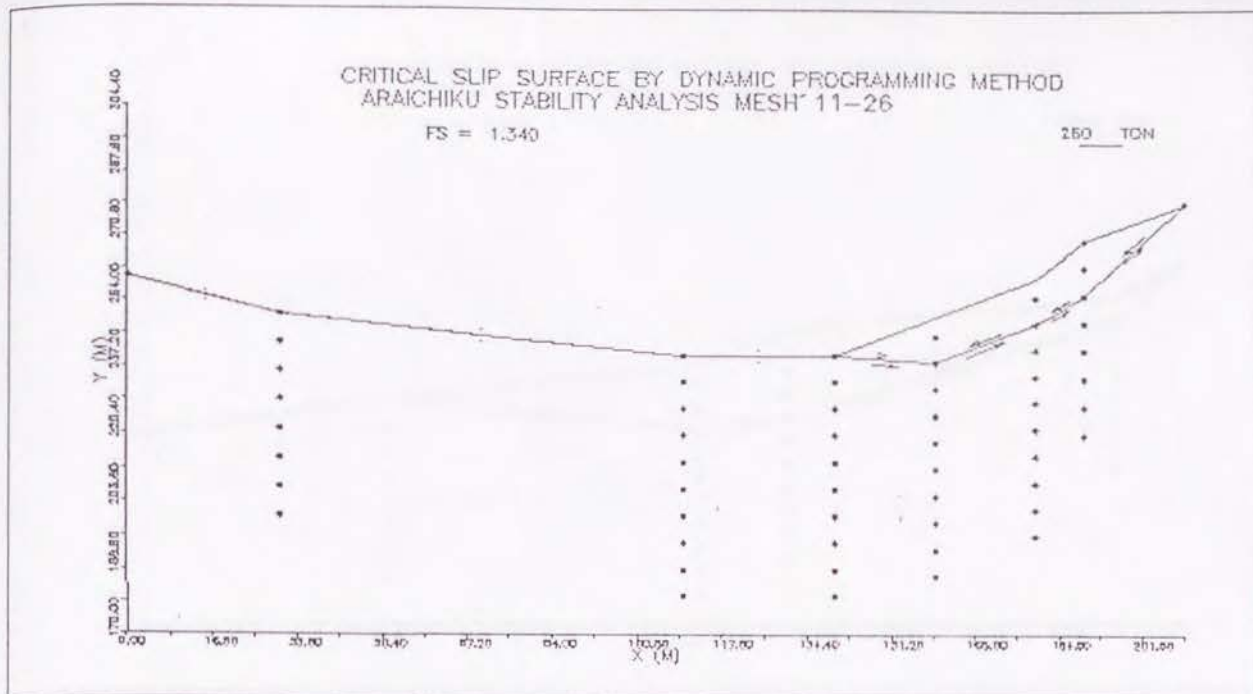
CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKU STABILITY ANALYSIS MESH 9-23

FS = 1.632

103 TON



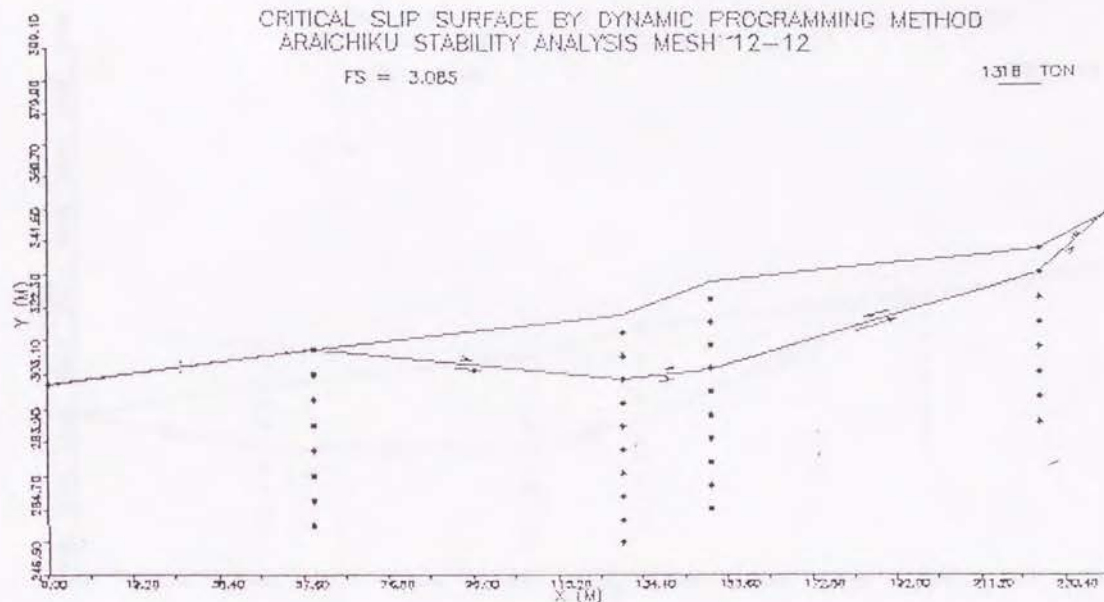




CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 12-12

FS = 3.085

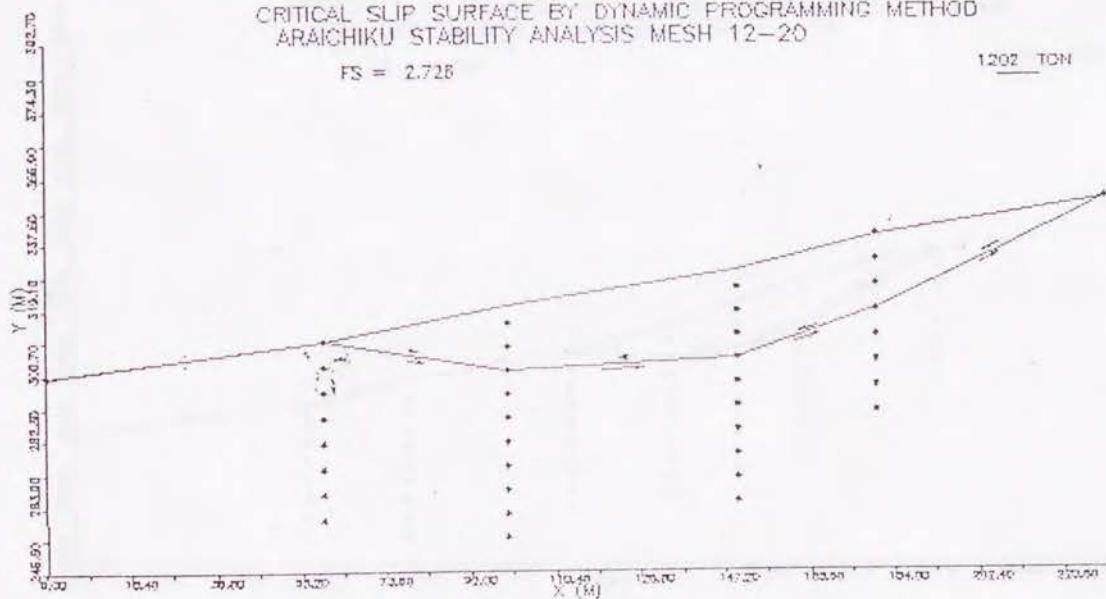
1318 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 12-20

FS = 2.728

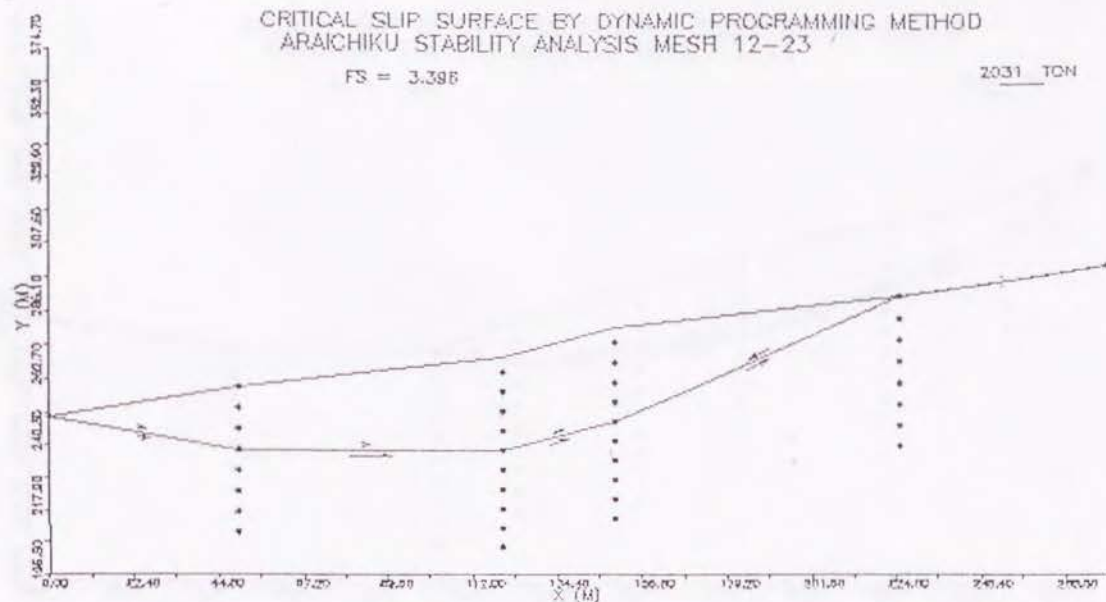
1202 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 12-23

FS = 3.386

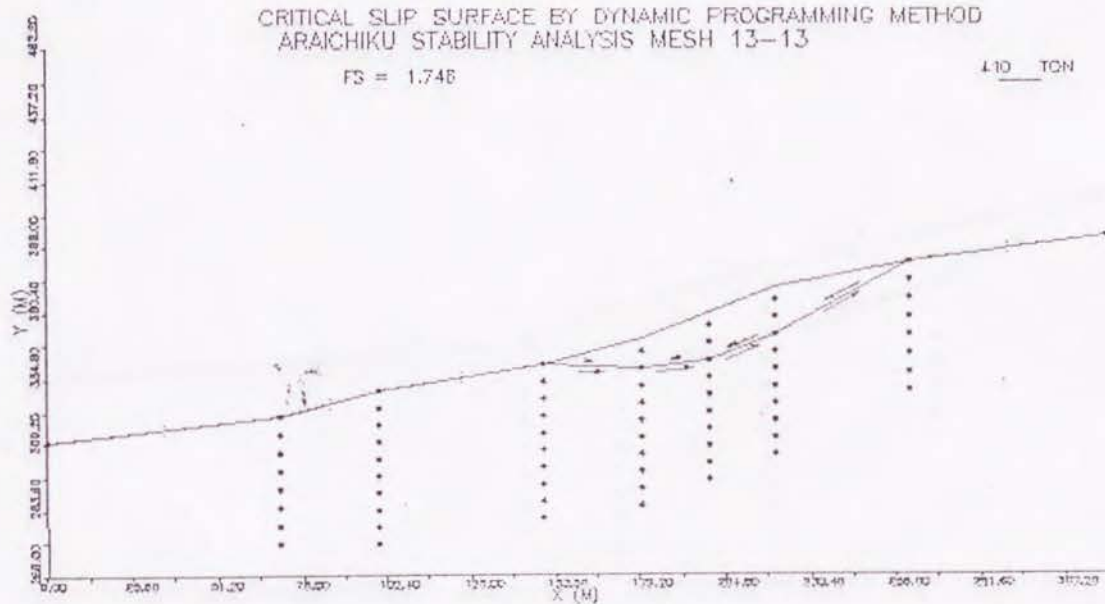
2031 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 13-13

FS = 1.746

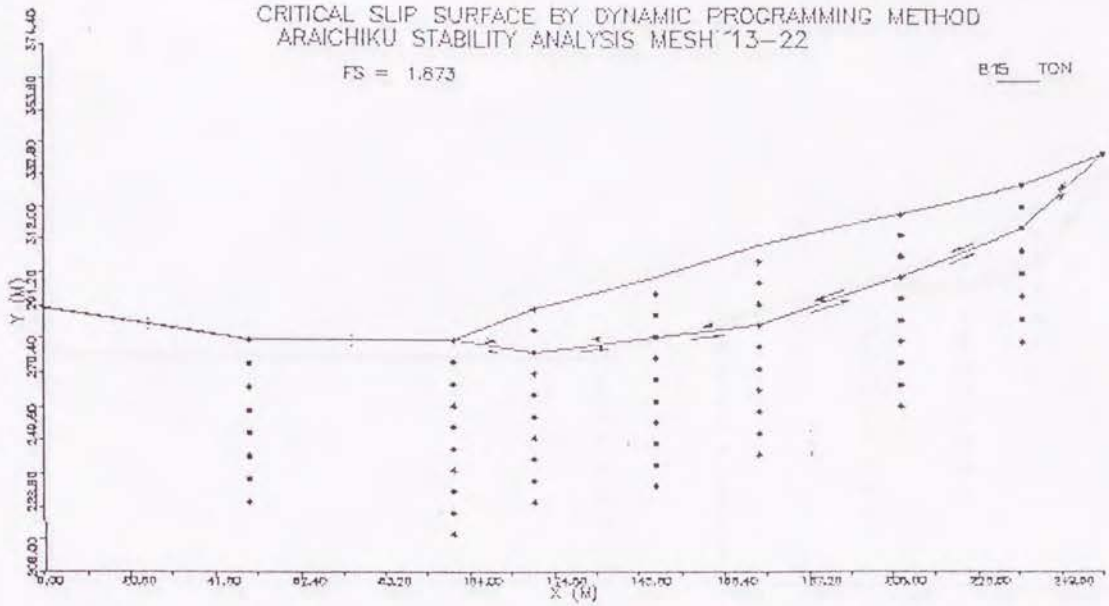
410 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 13-22

FS = 1.873

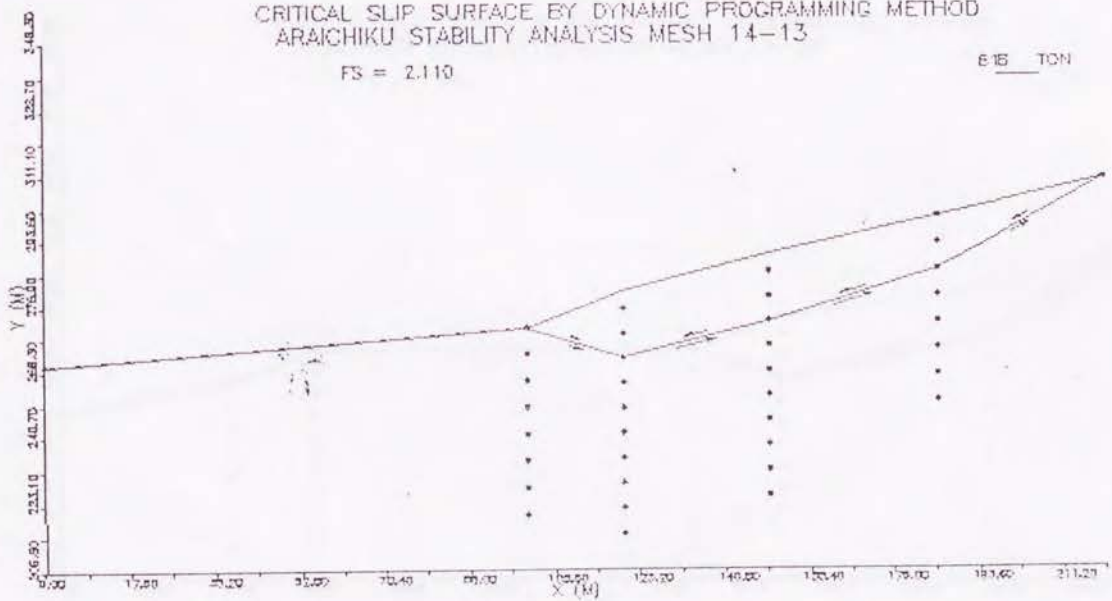
815 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 14-13

FS = 2.110

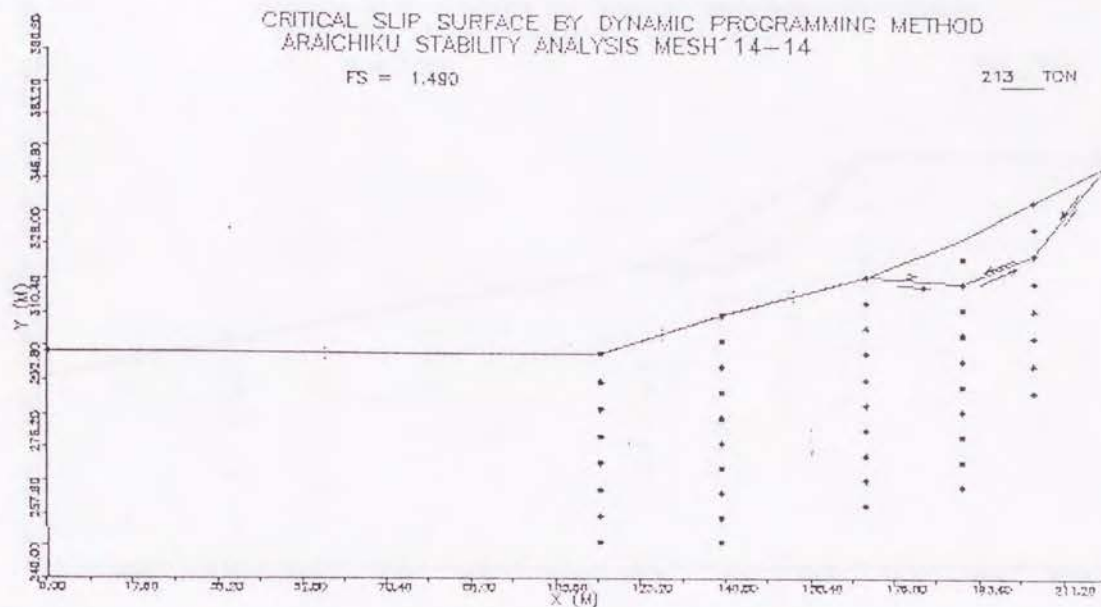
815 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 14-14

FS = 1.480

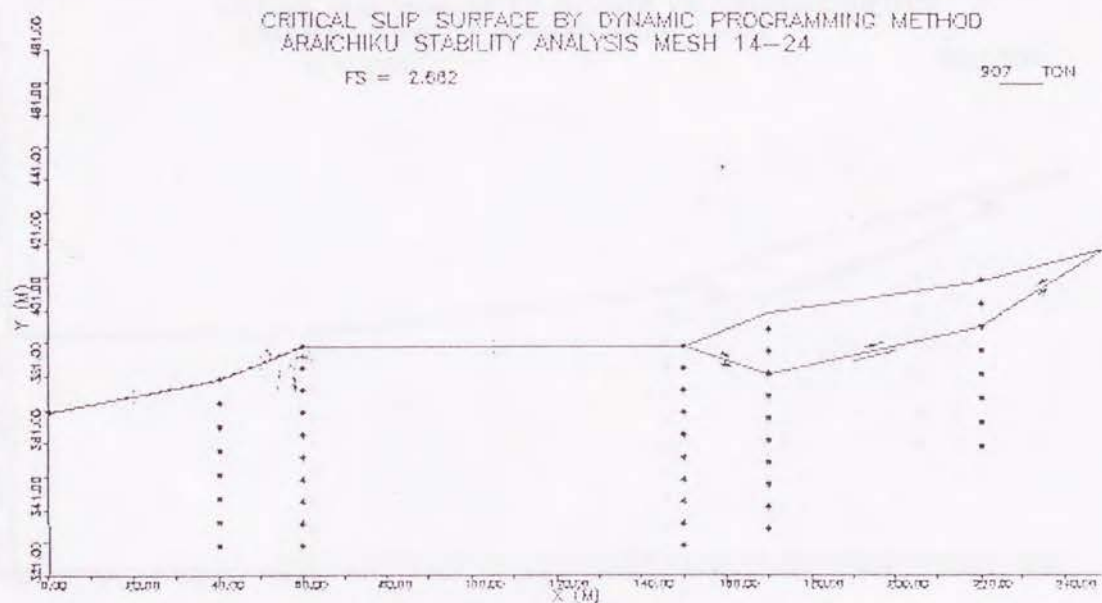
213 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 14-24

FS = 2.582

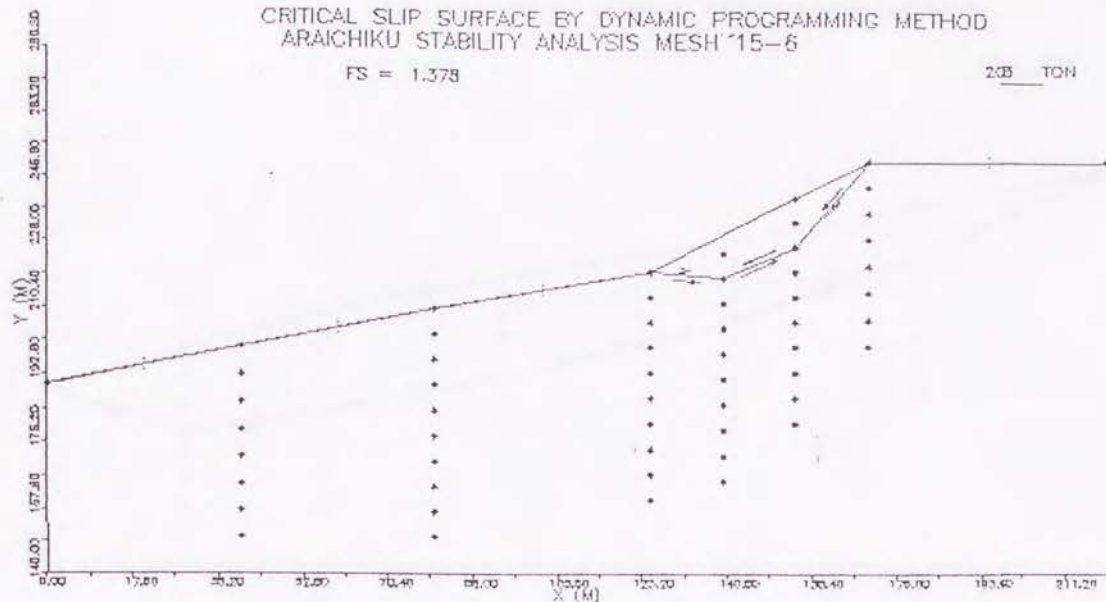
907 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 15-6

FS = 1.378

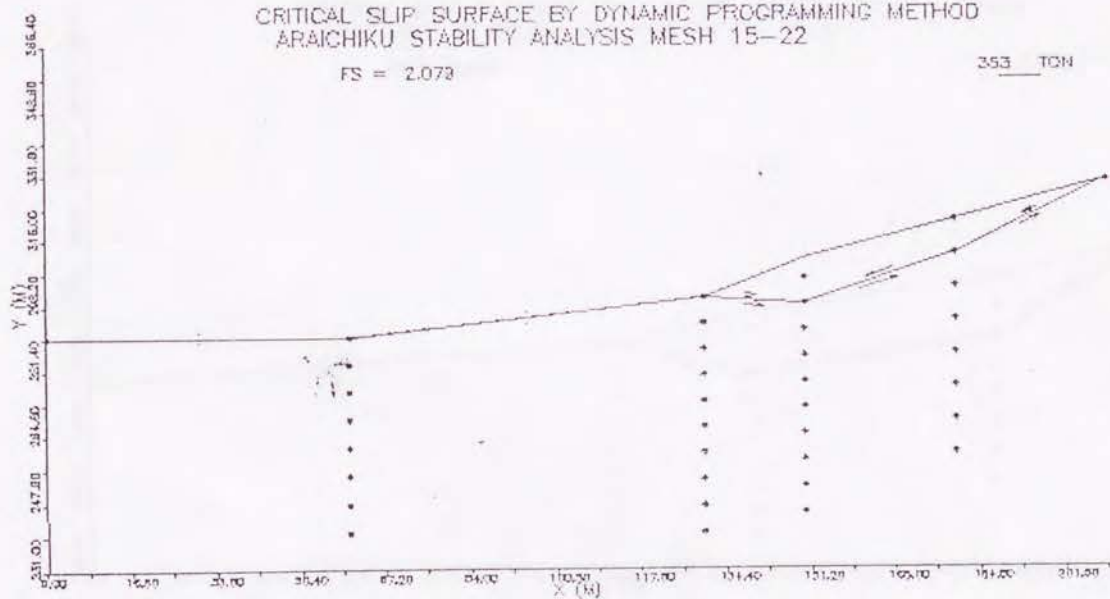
200 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 15-22

FS = 2.073

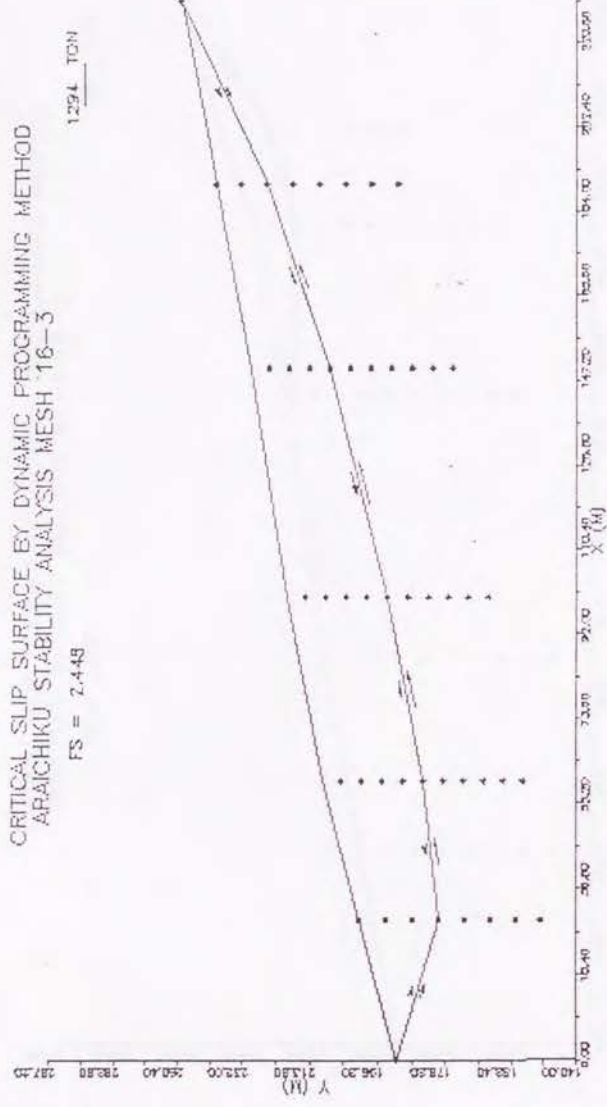
353 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 16-3

FS = 2.448

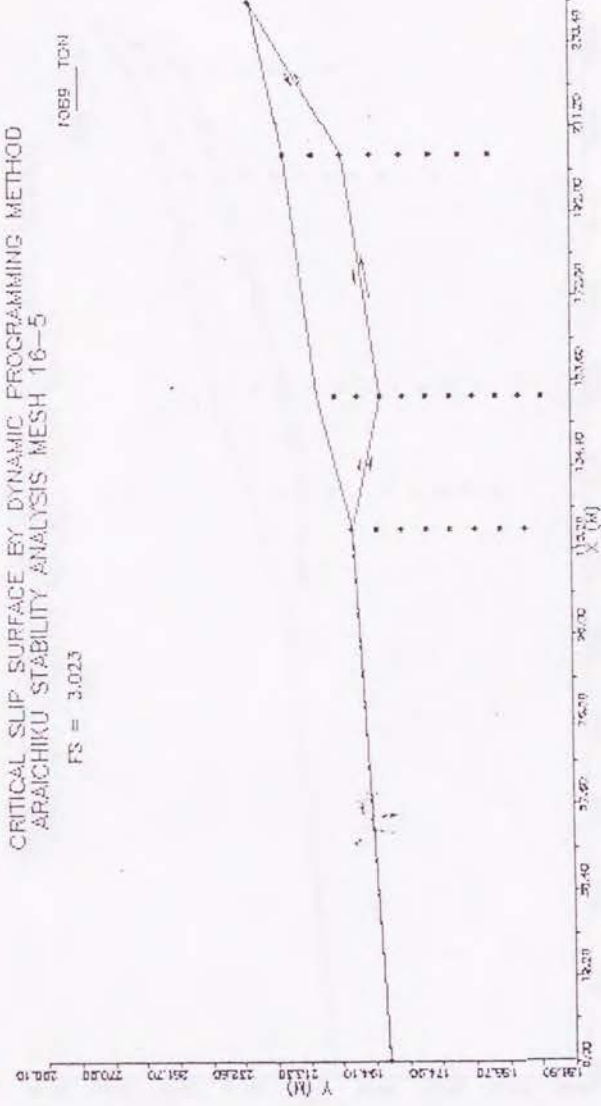
1294 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 16-5

FS = 3.023

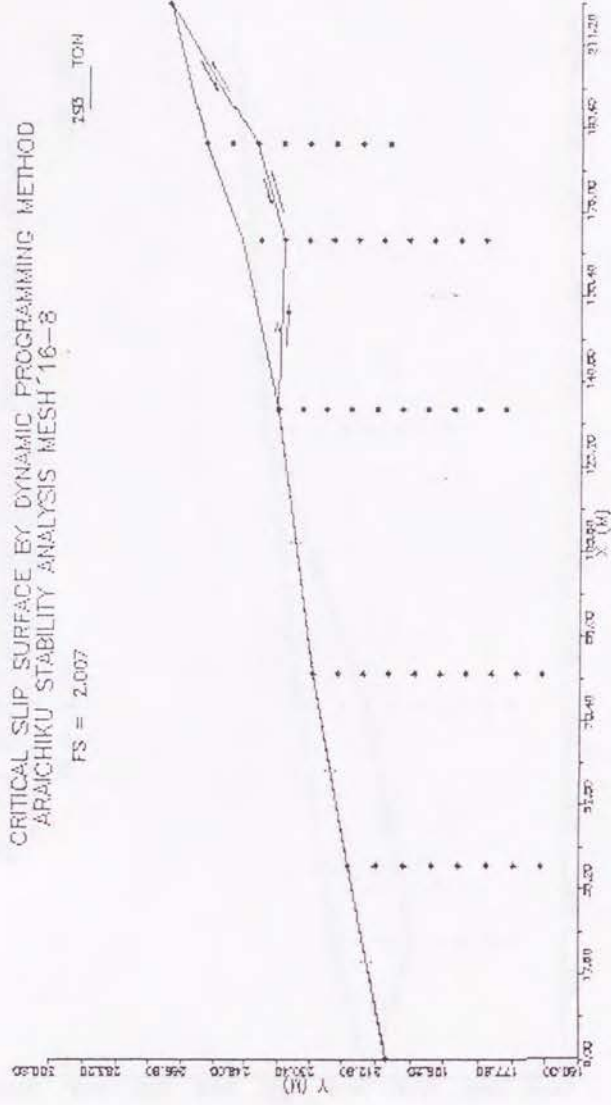
1059 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 16-2

FS = 2.007

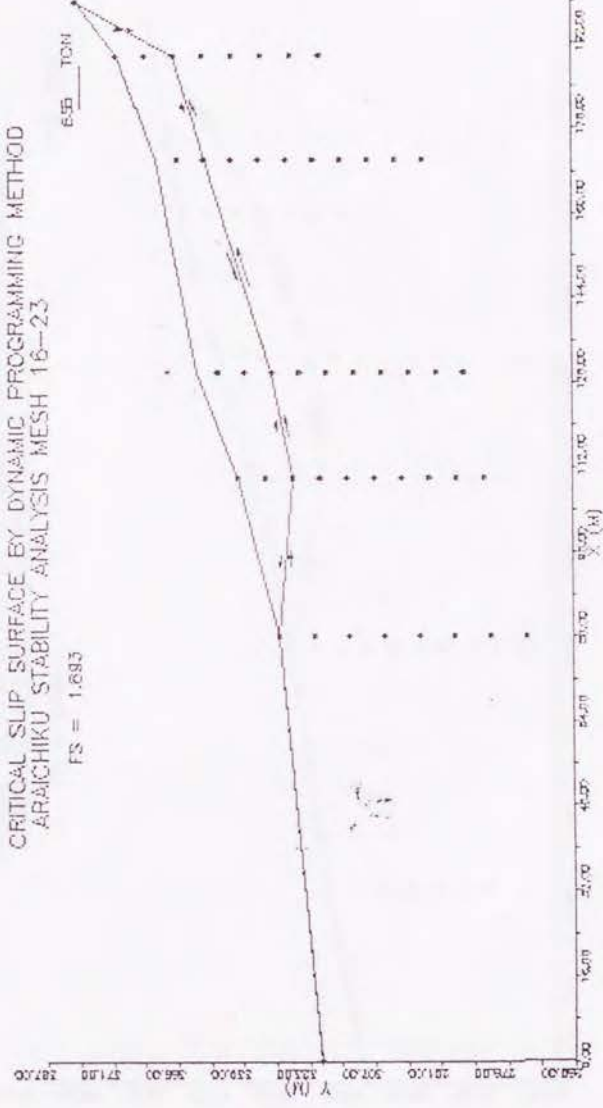
195 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 16-23

FS = 1.693

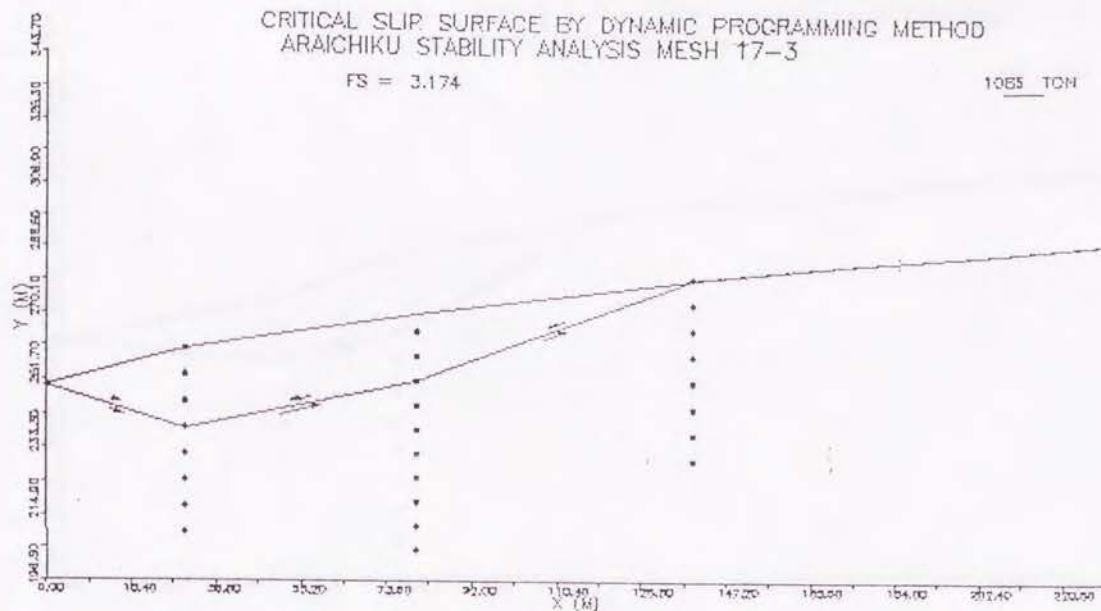
655 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 17-3

FS = 3.174

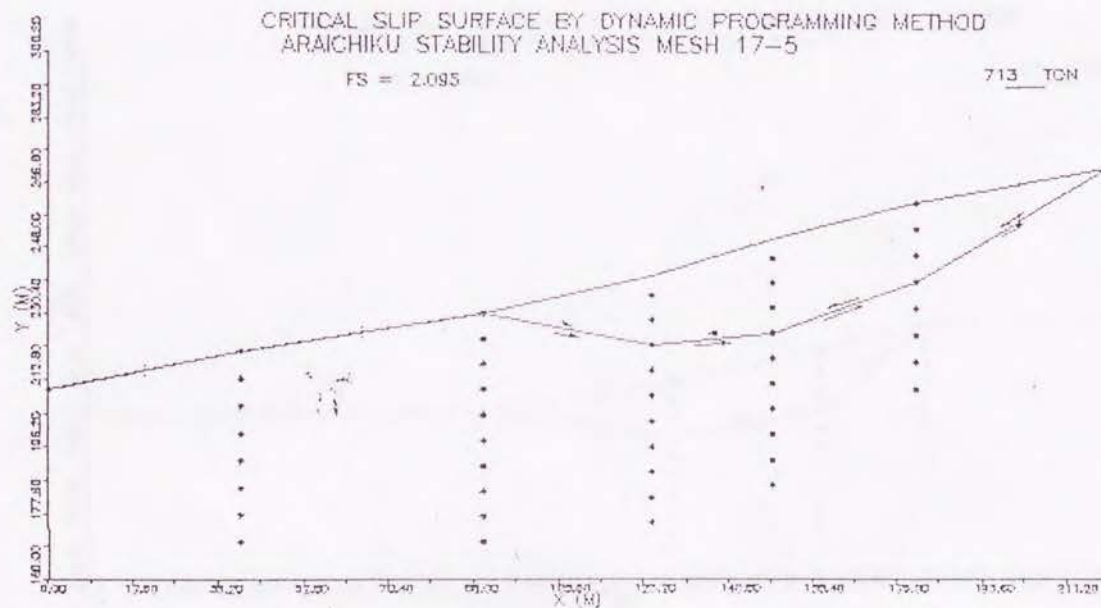
1085 TON

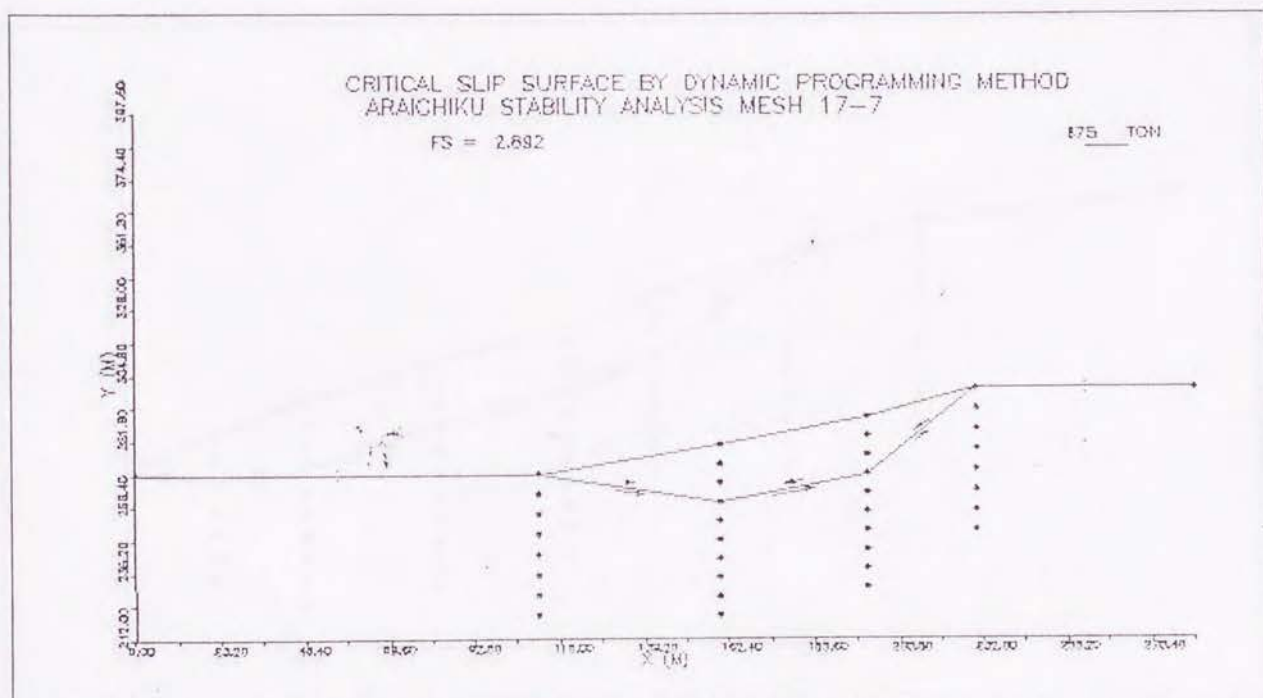
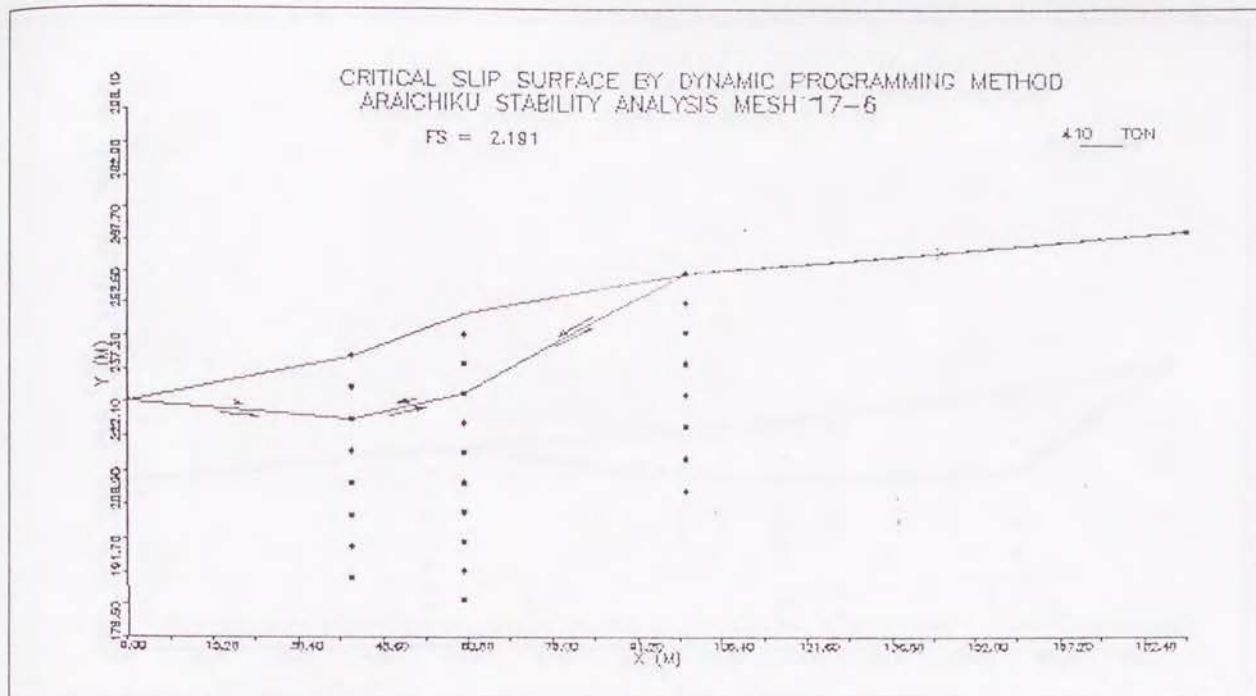


CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 17-5

FS = 2.095

713 TON

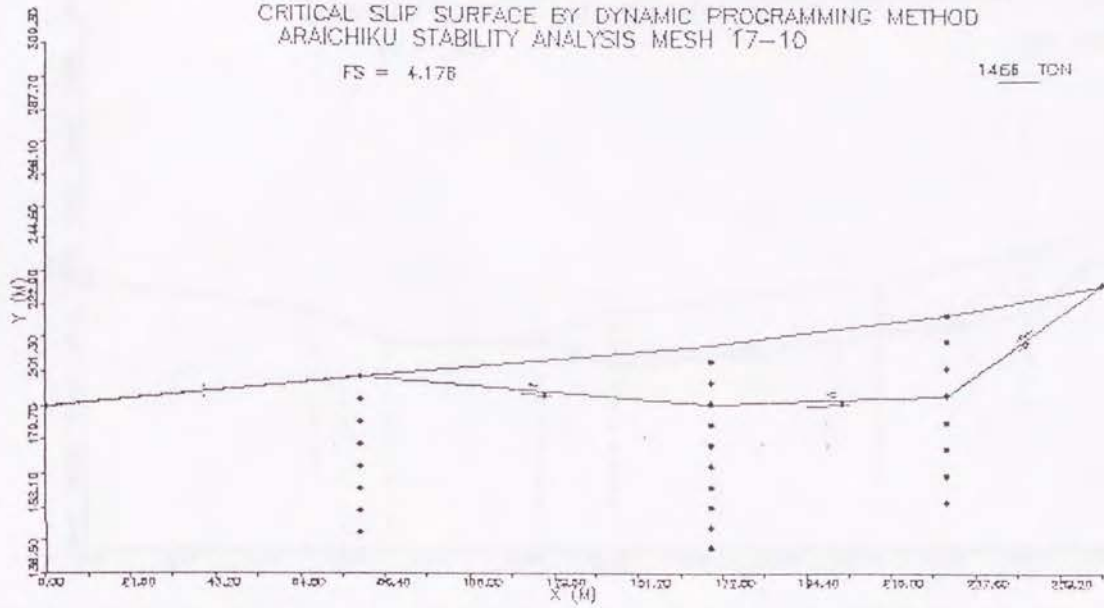




CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 17-10

FS = 4.178

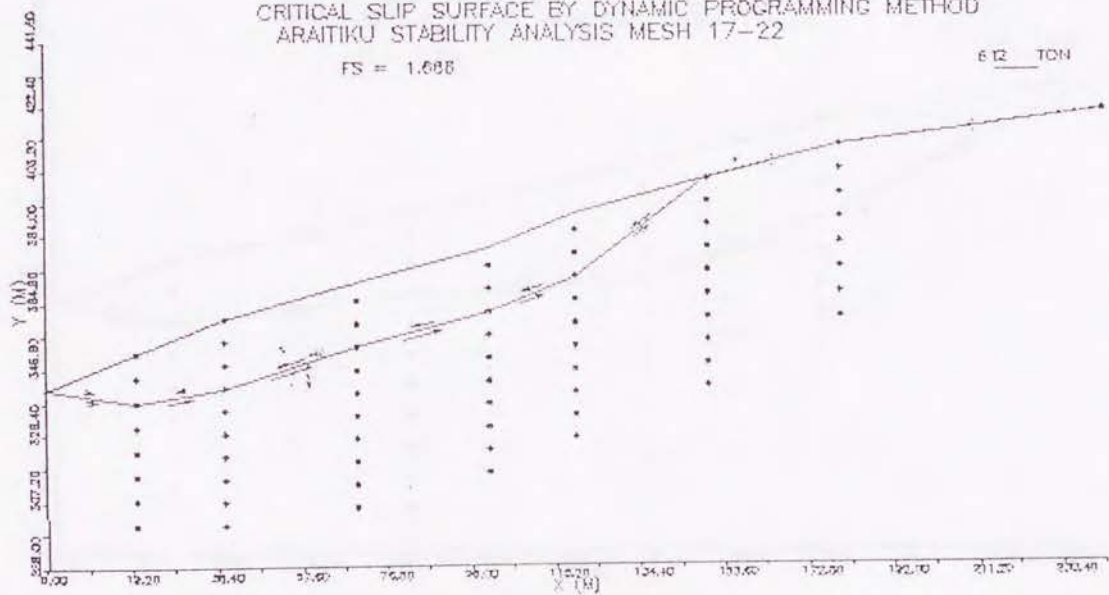
1466 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 17-22

FS = 1.688

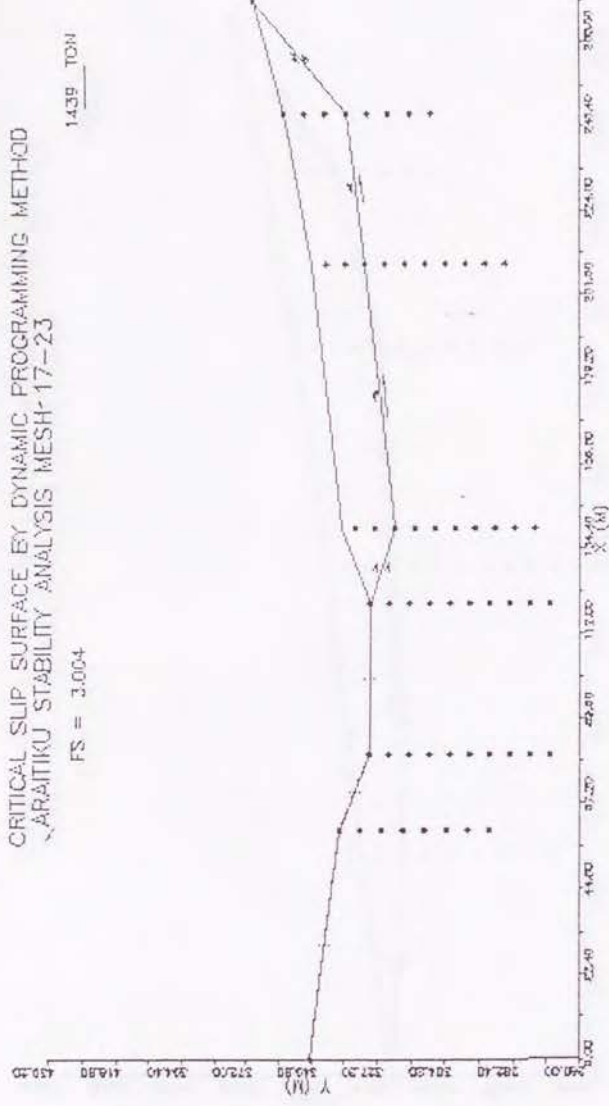
612 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
 ARAIHIKU STABILITY ANALYSIS MESH-17-23

FS = 3.004

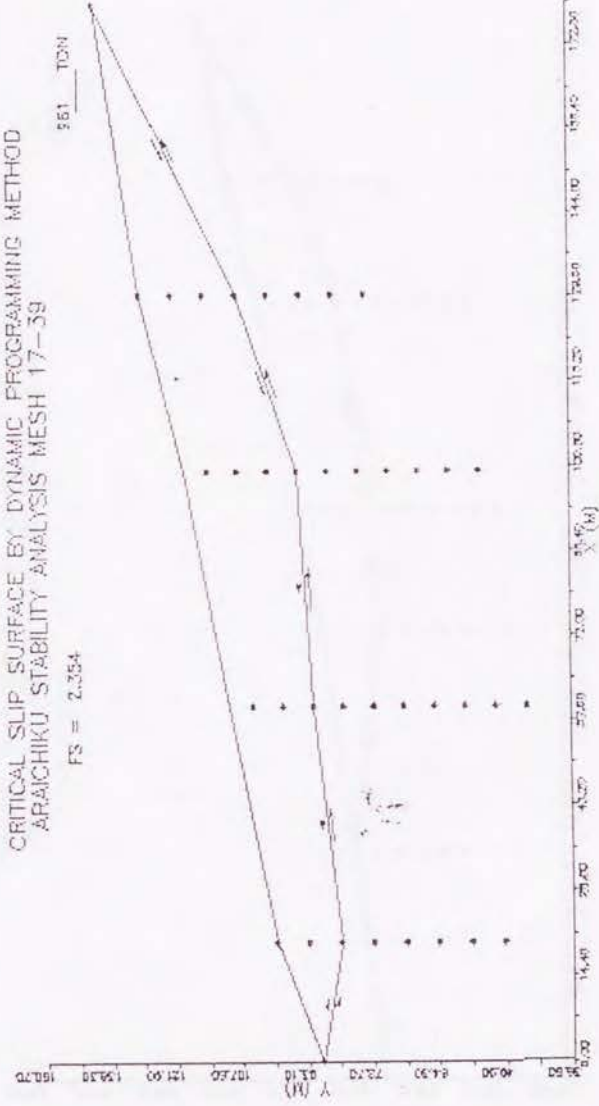
1439 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
 ARAIHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 17-39

FS = 2.354

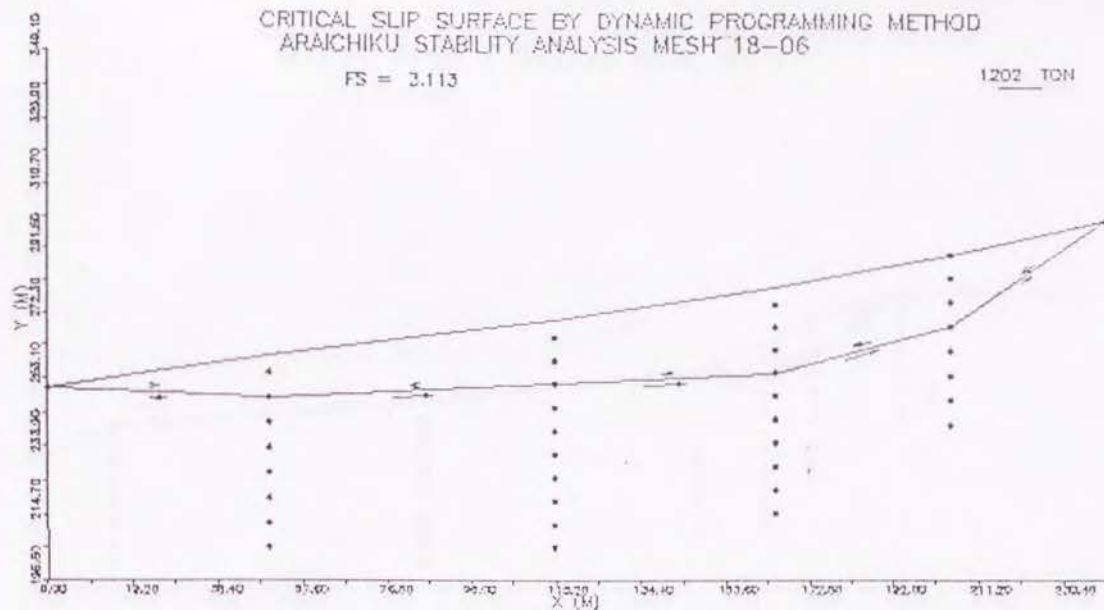
961 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 18-06

FS = 3.113

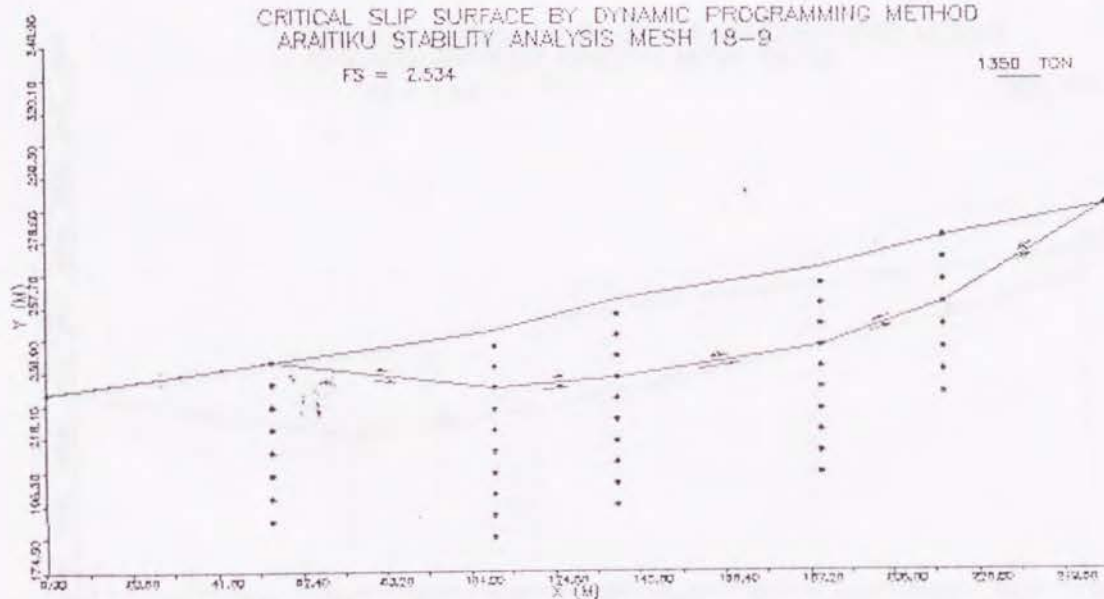
1202 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 18-9

FS = 2.534

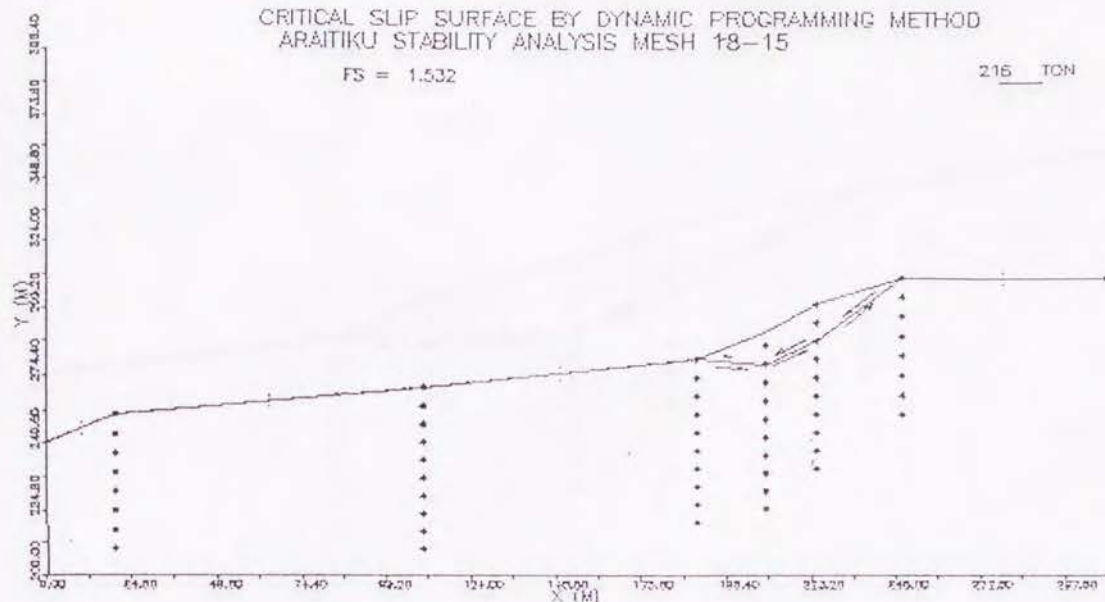
1350 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 18-15

FS = 1.532

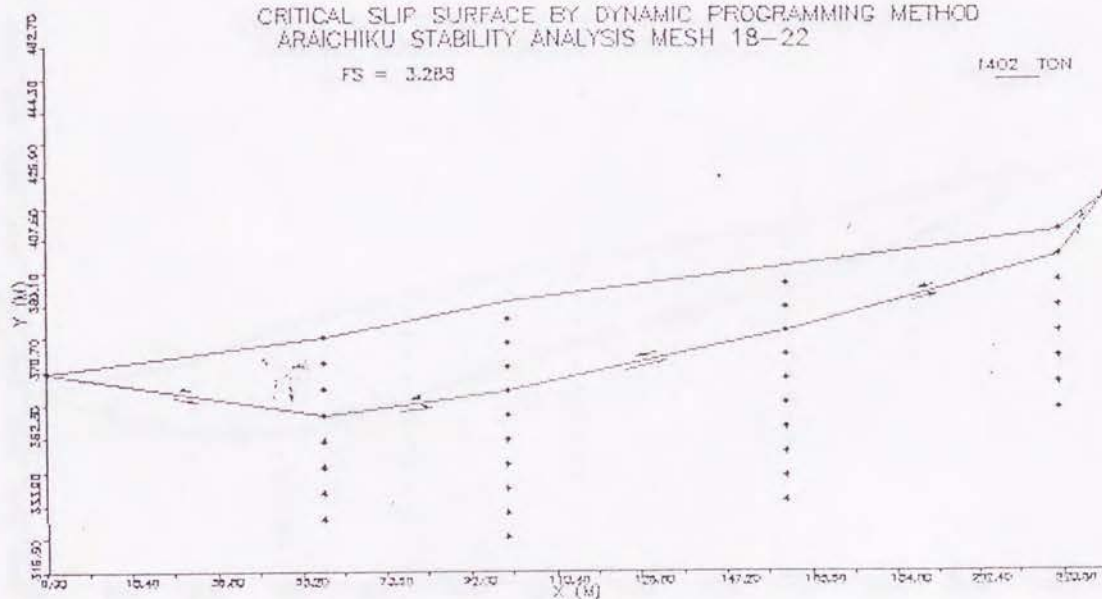
215 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 18-22

FS = 1.283

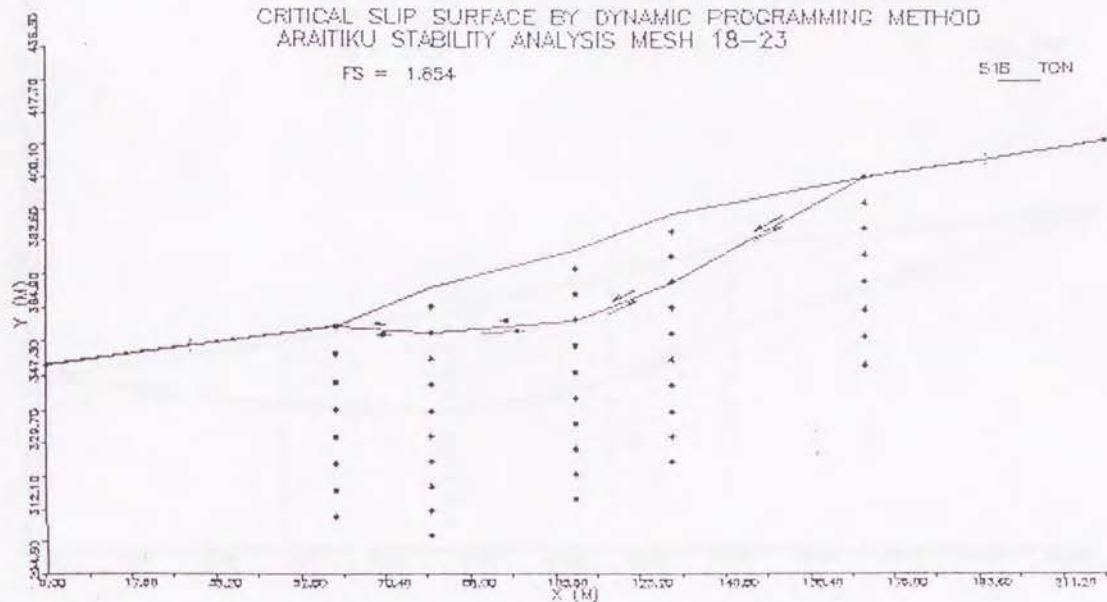
1402 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKU STABILITY ANALYSIS MESH 18-23

FS = 1.654

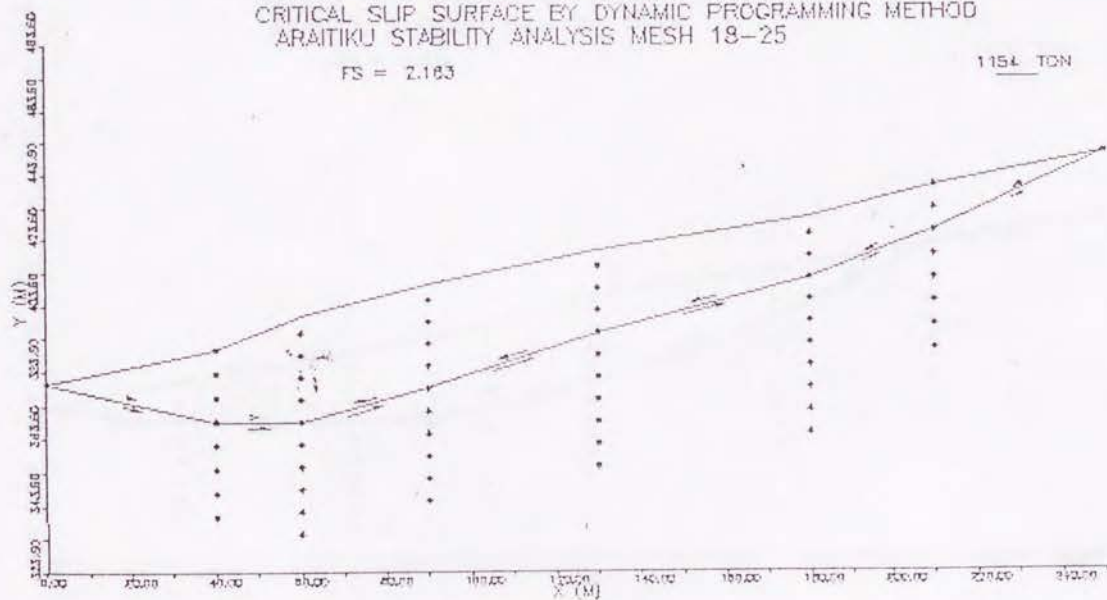
515 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKU STABILITY ANALYSIS MESH 18-25

FS = 2.163

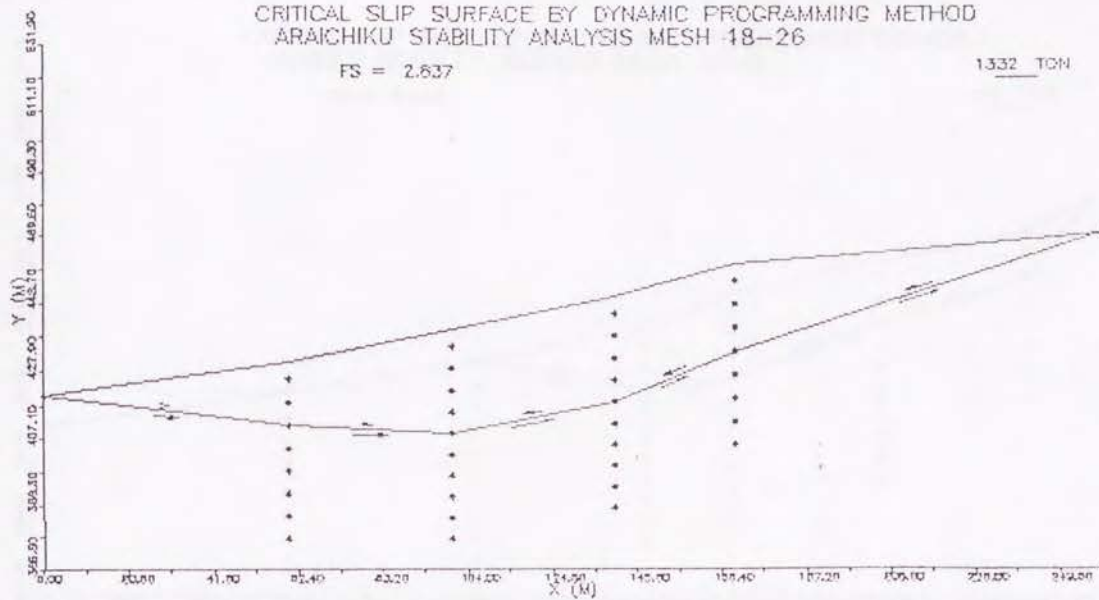
1154 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 18-26

FS = 2.637

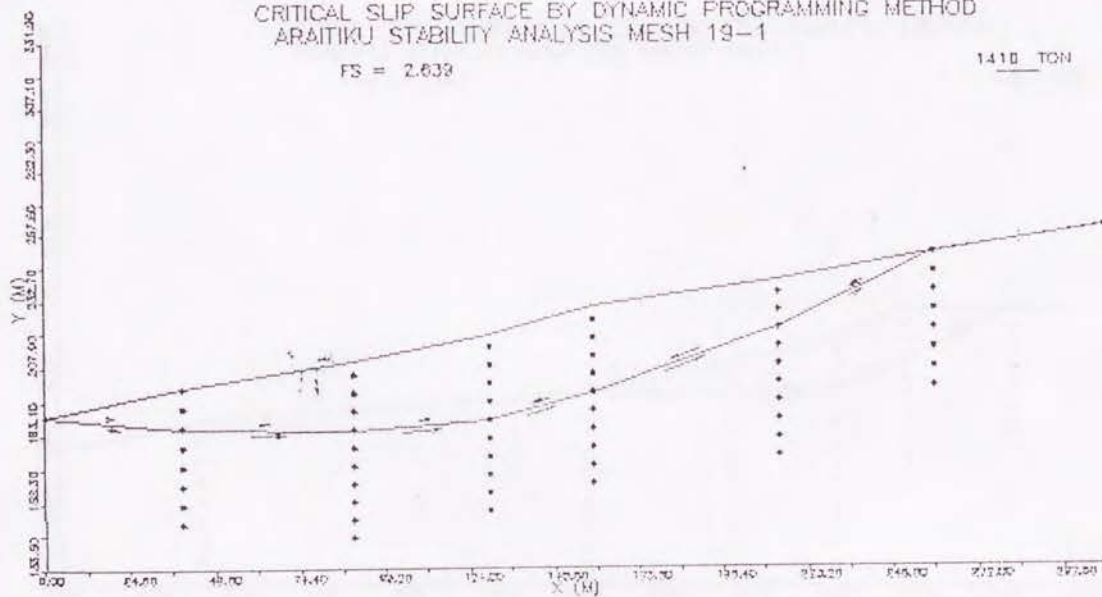
1.332 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 19-1

FS = 2.639

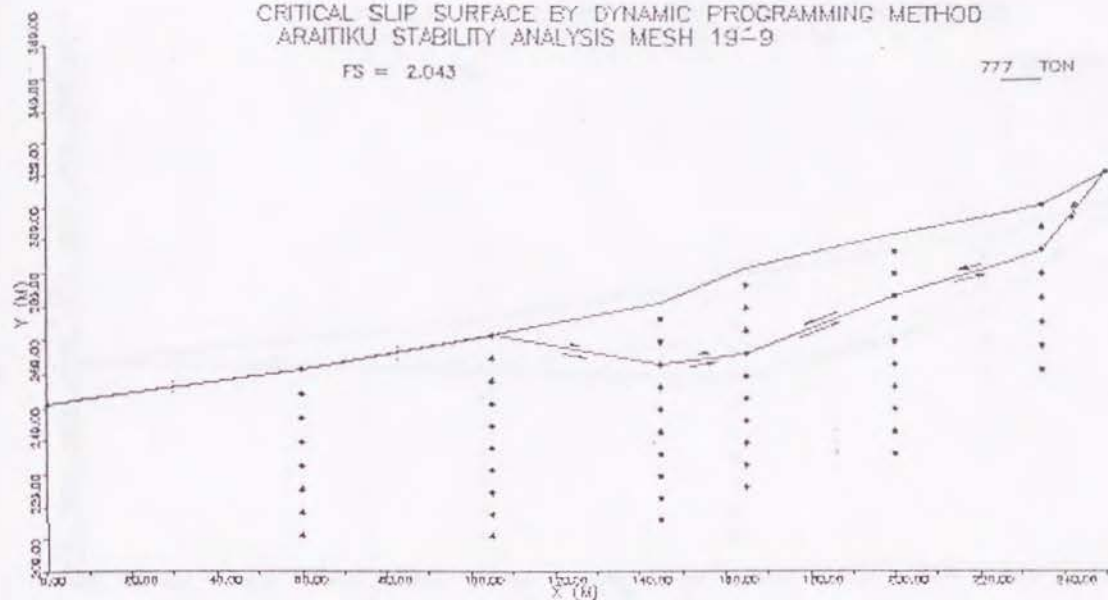
1.410 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKU STABILITY ANALYSIS MESH 19-9

FS = 2.043

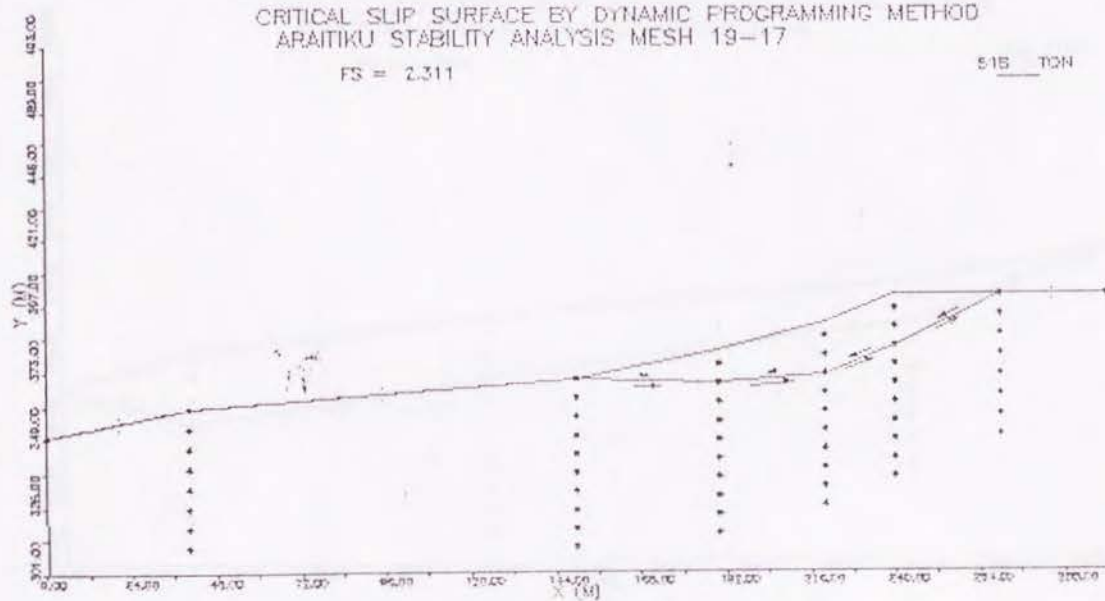
777 TON

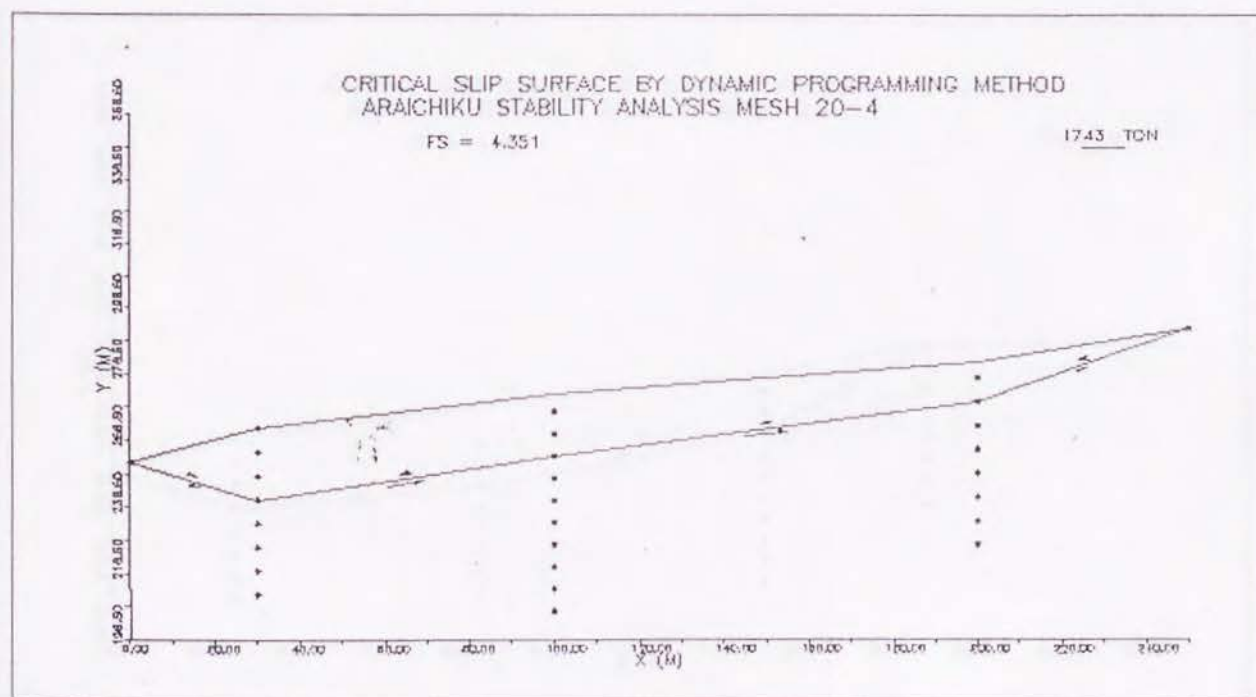
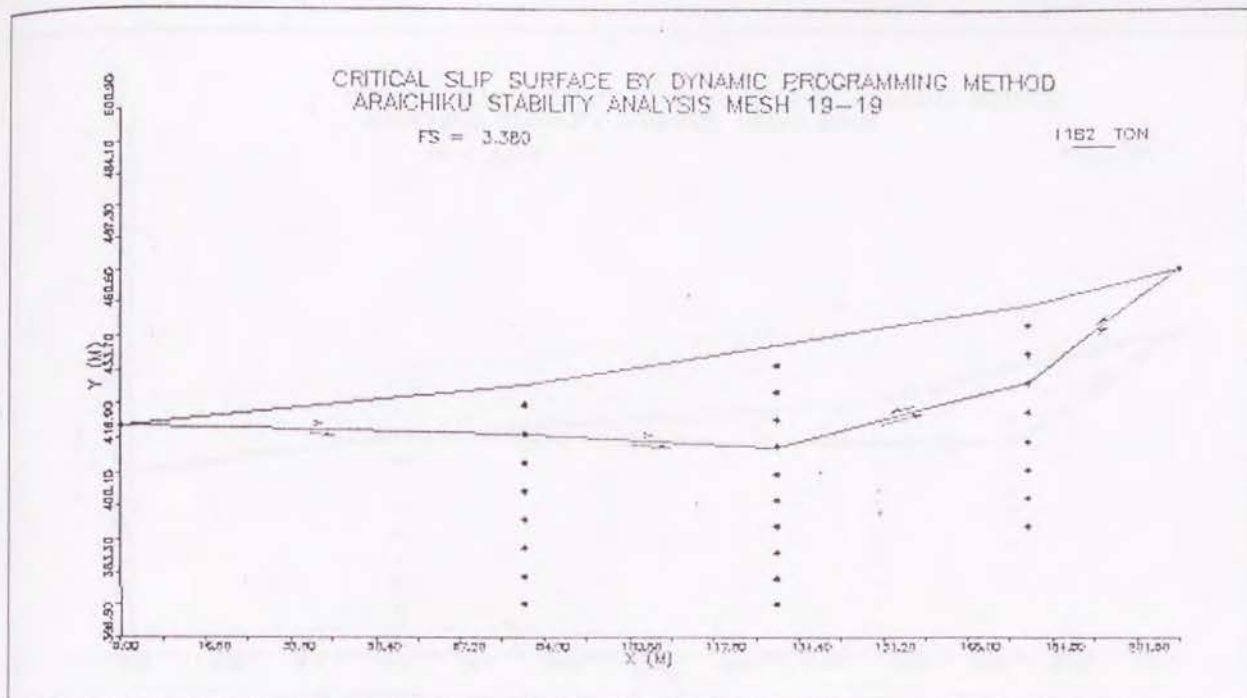


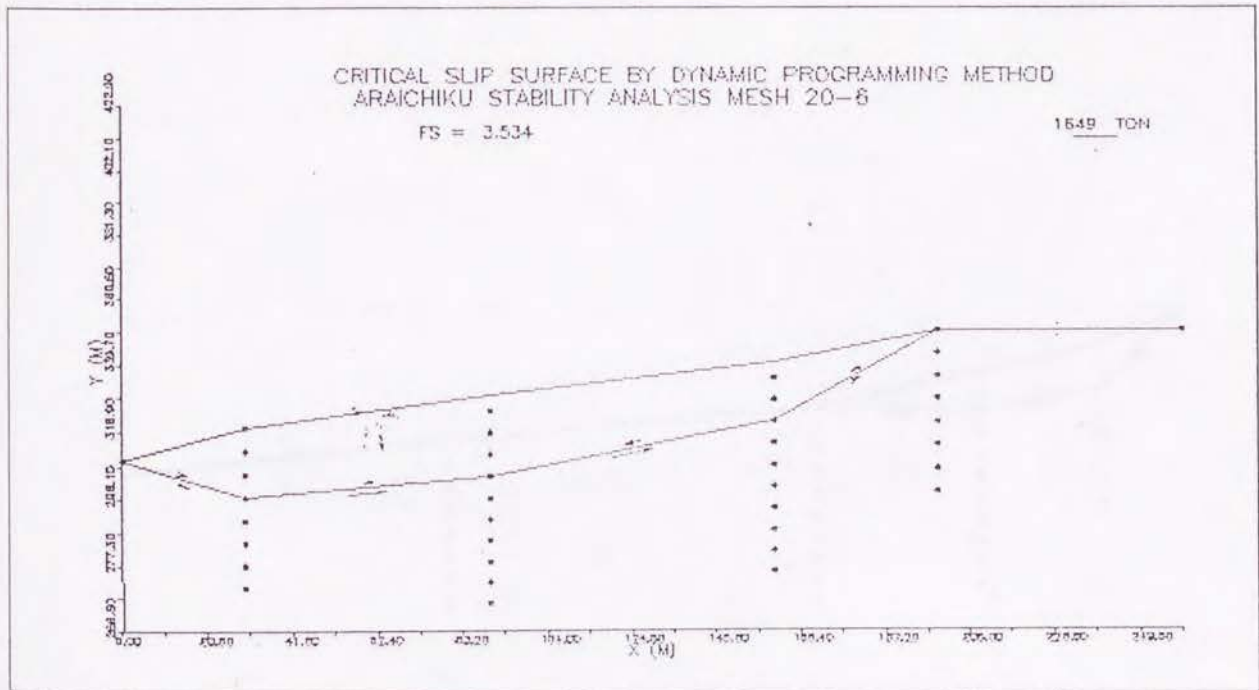
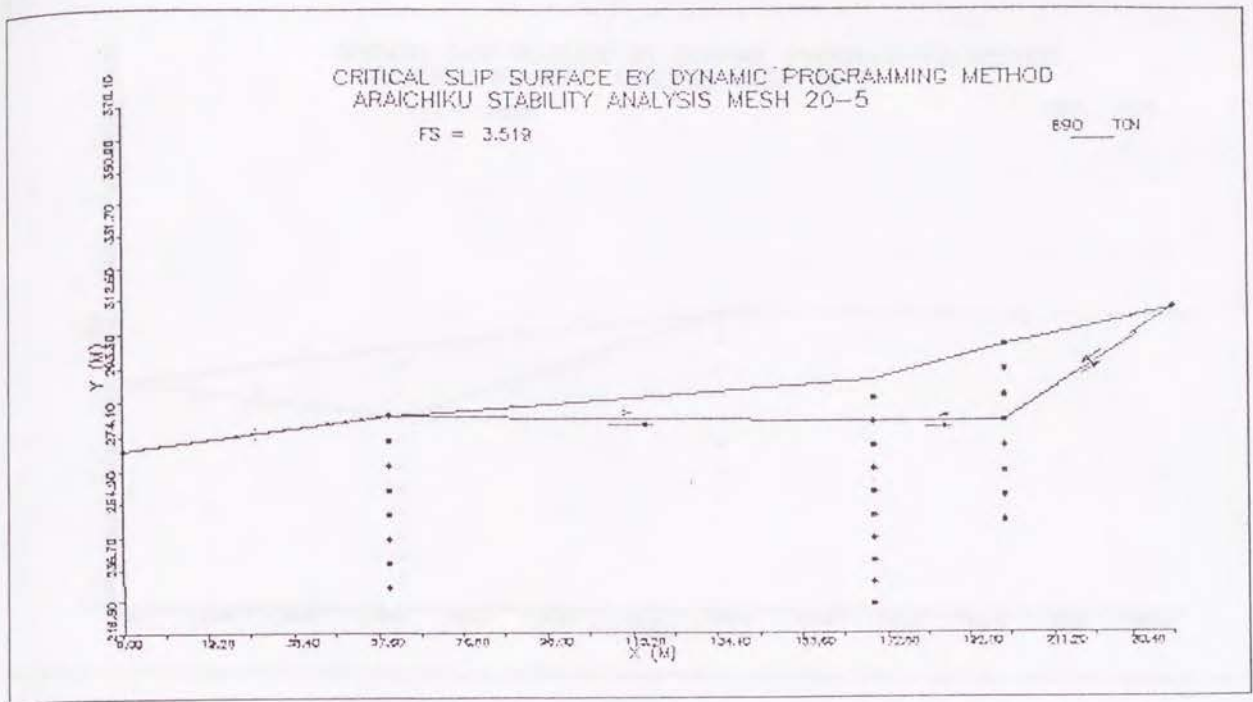
CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKU STABILITY ANALYSIS MESH 19-17

FS = 2.311

515 TON



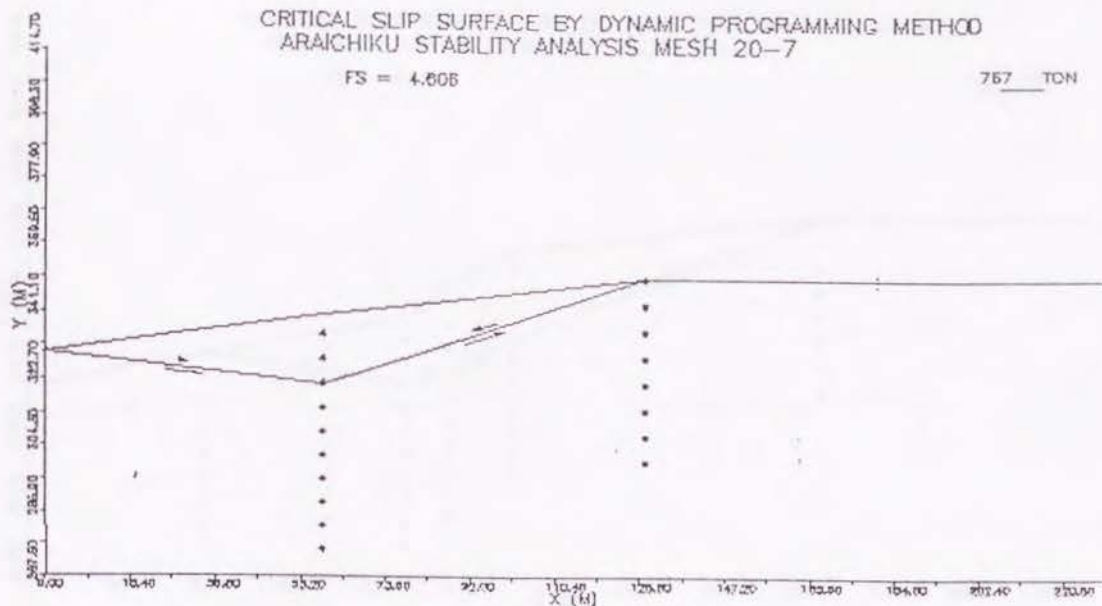




CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 20-7

FS = 4.605

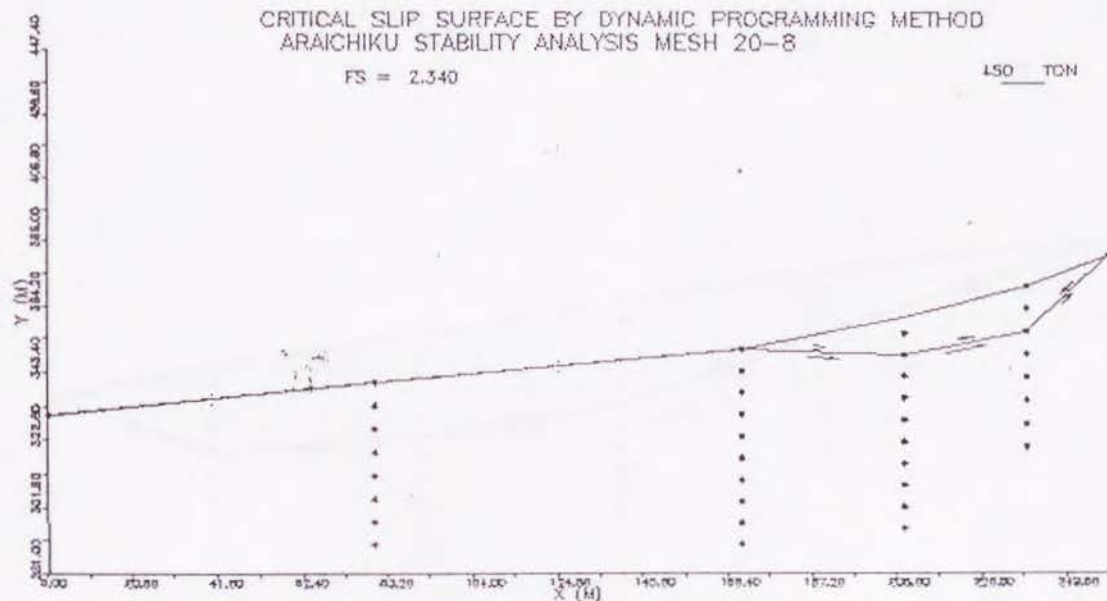
767 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 20-8

FS = 2.340

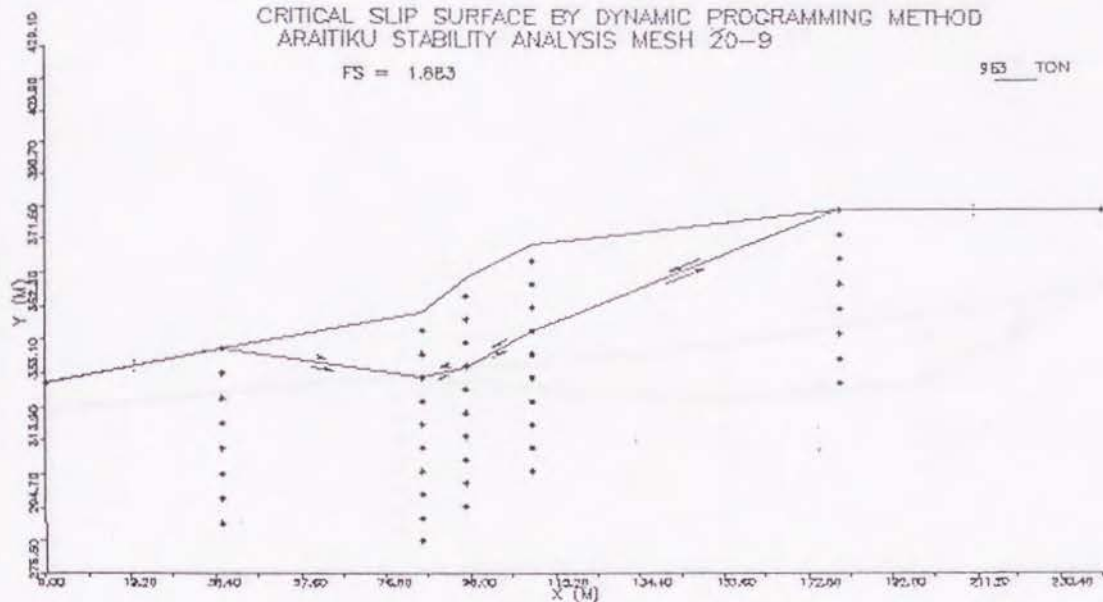
150 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 20-9

FS = 1.853

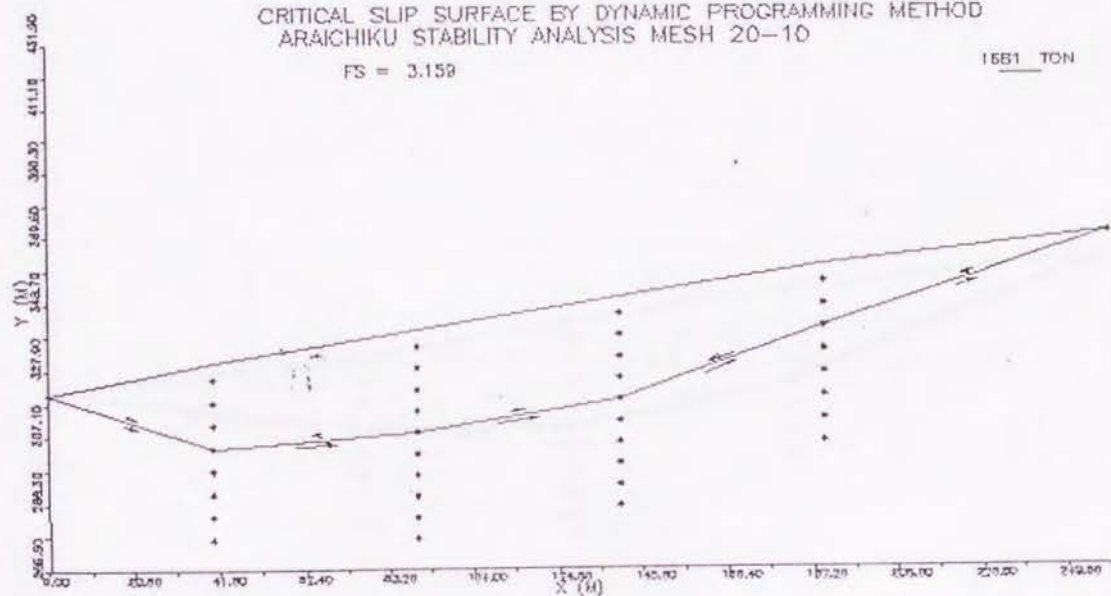
953 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 20-10

FS = 3.159

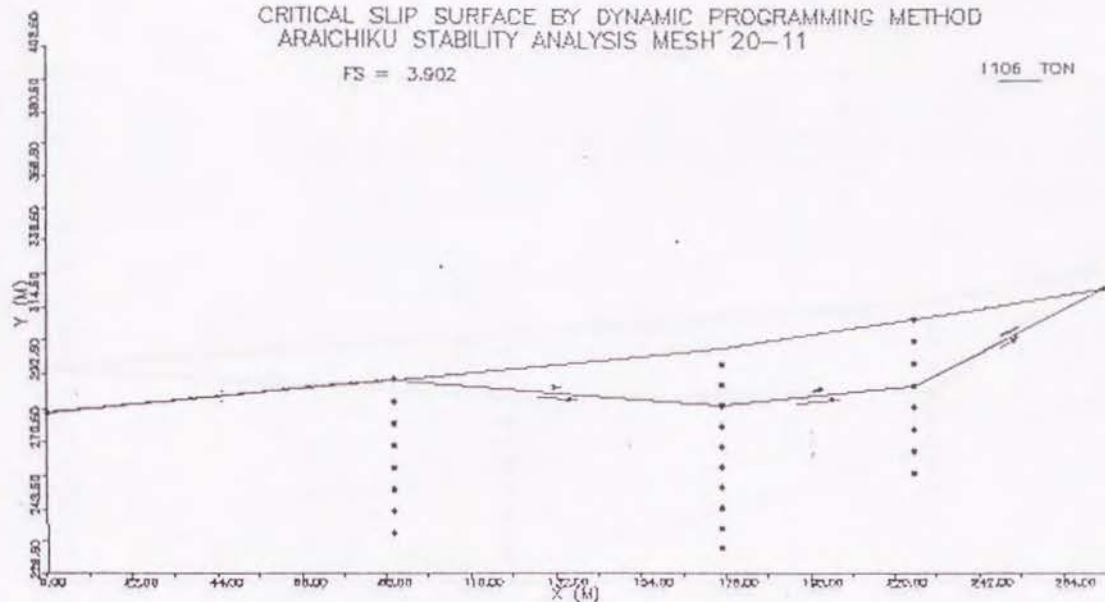
1551 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 20-11

FS = 3.902

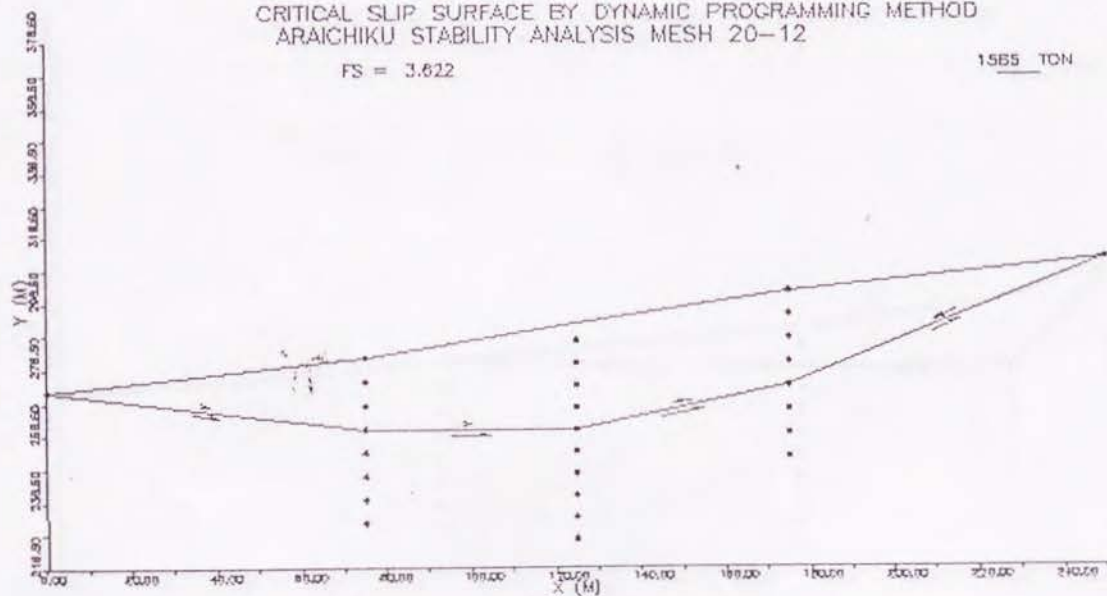
1106 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 20-12

FS = 3.622

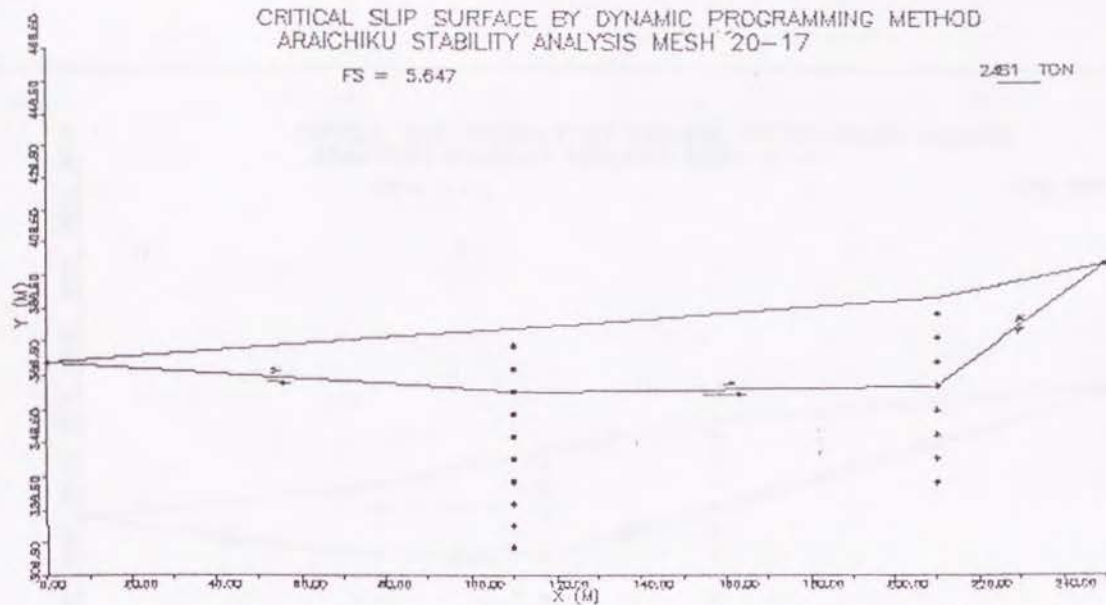
1565 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 20-17

FS = 5.647

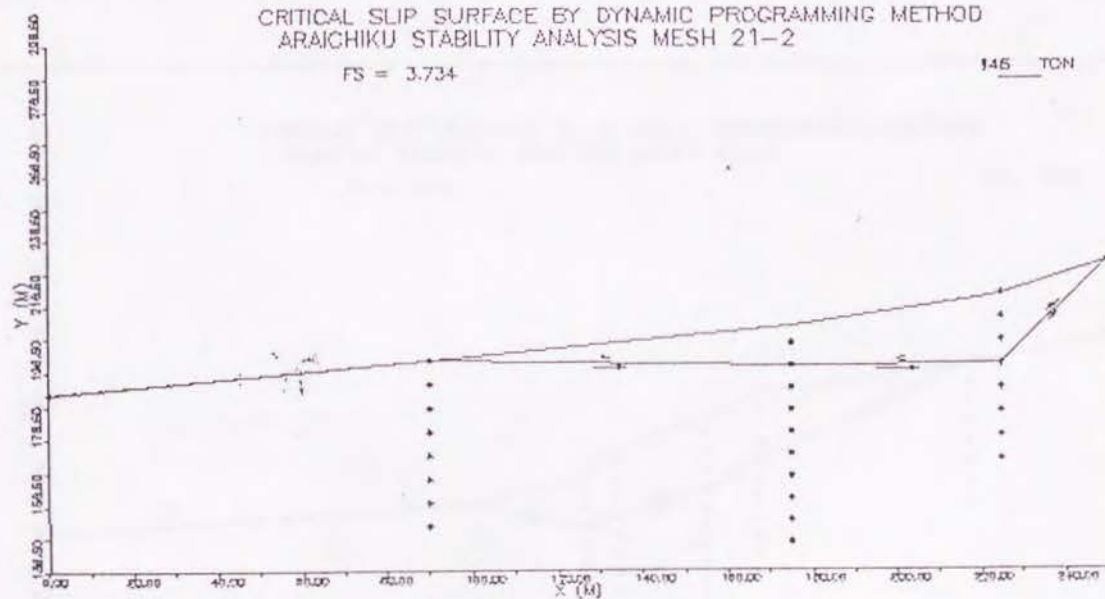
2431 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 21-2

FS = 3.734

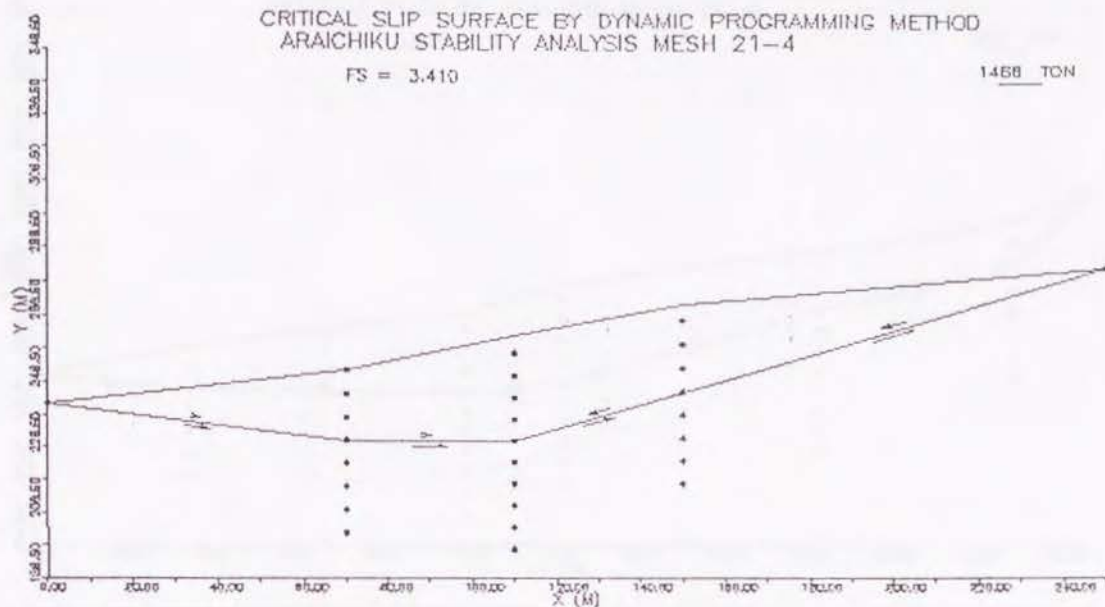
145 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 21-4

FS = 3.410

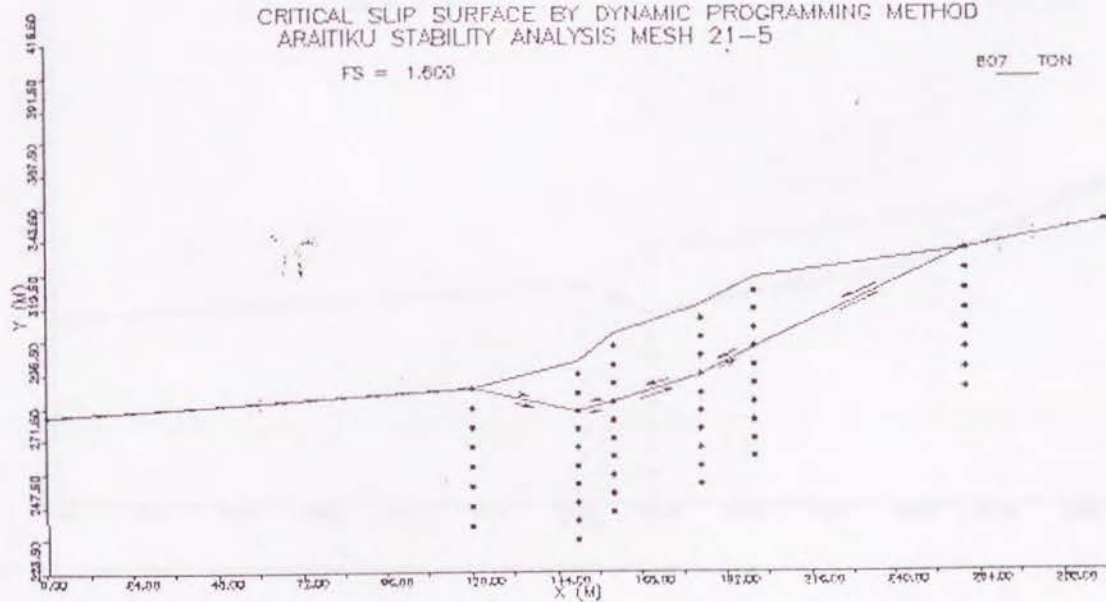
1468 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 21-5

FS = 1.600

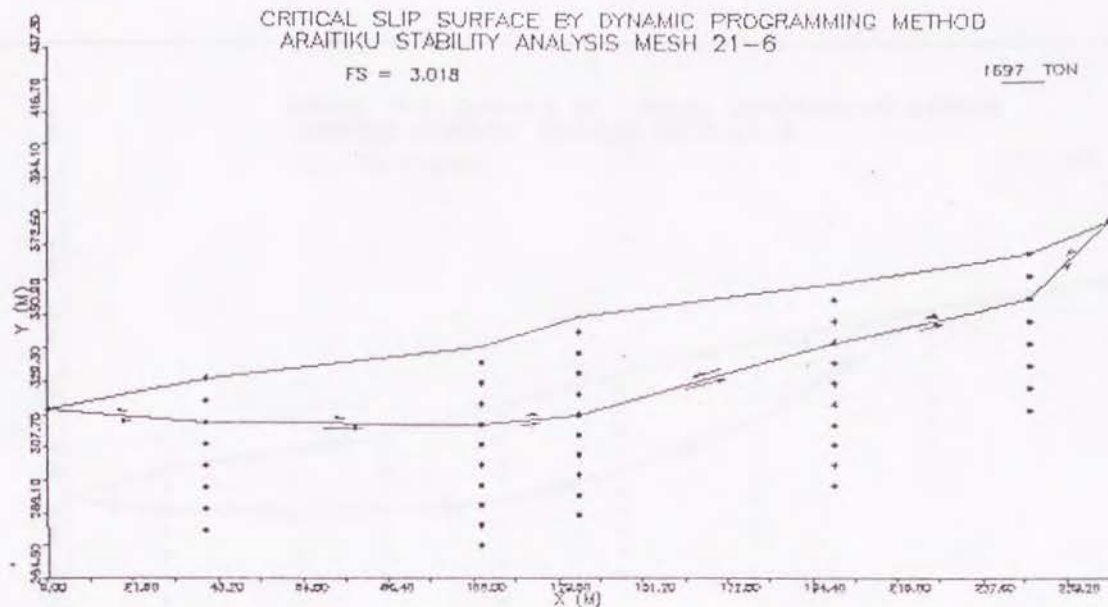
807 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 21-6

FS = 3.018

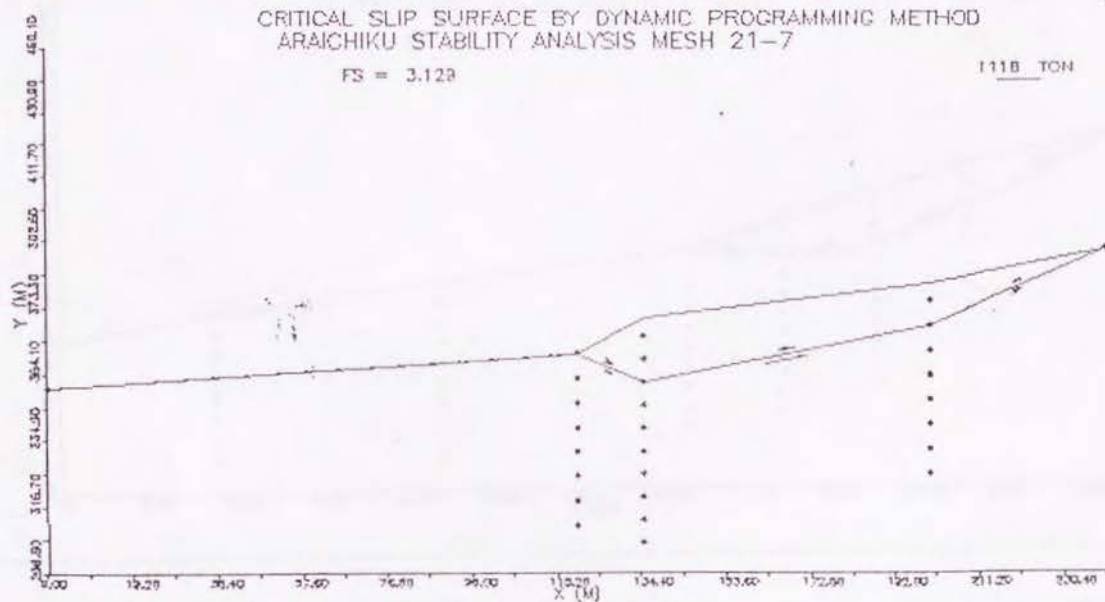
1597 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 21-7

FS = 3.123

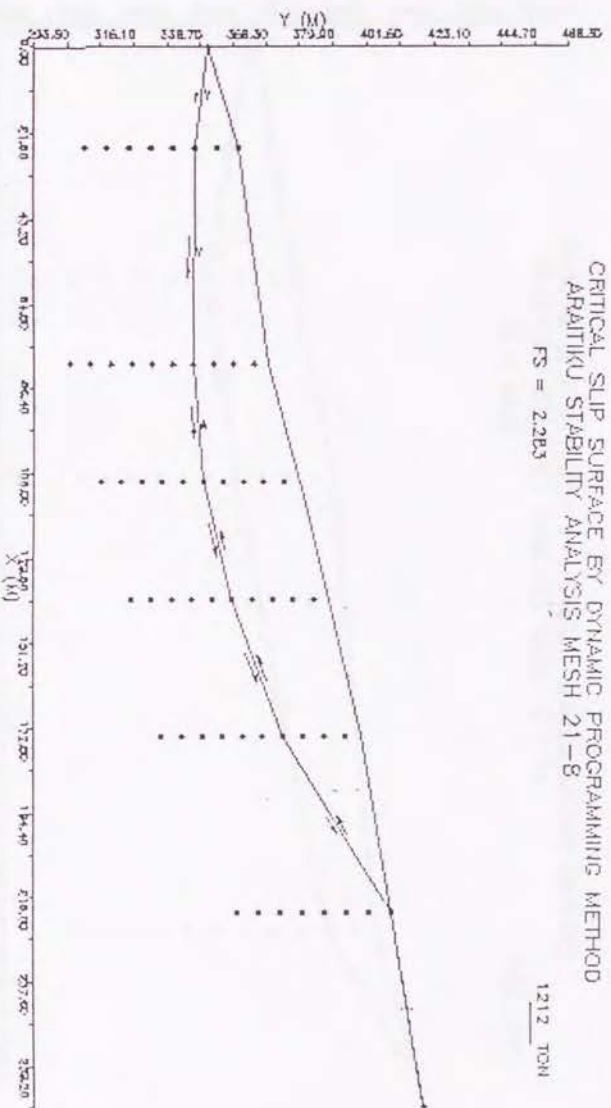
1118 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 21-8

FS = 2.283

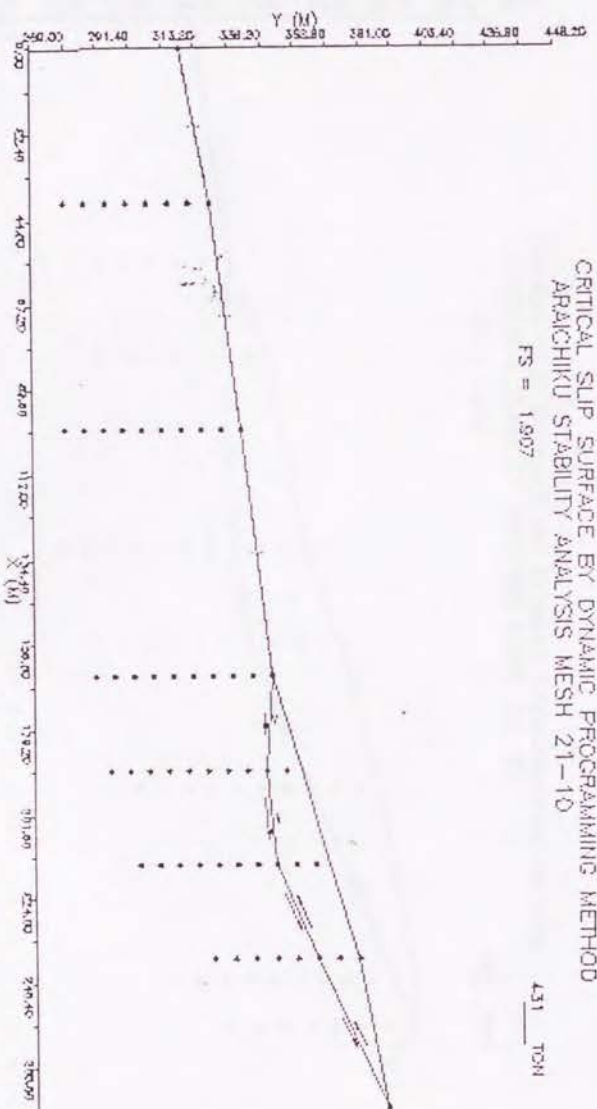
1212 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 21-10

FS = 1.907

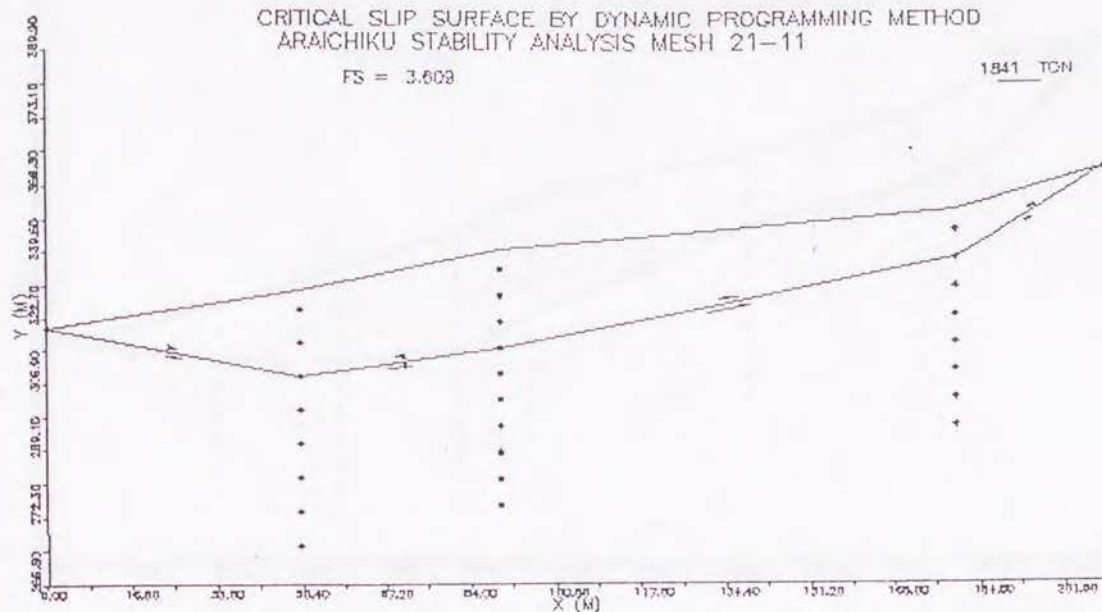
431 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 21-11

FS = 3.608

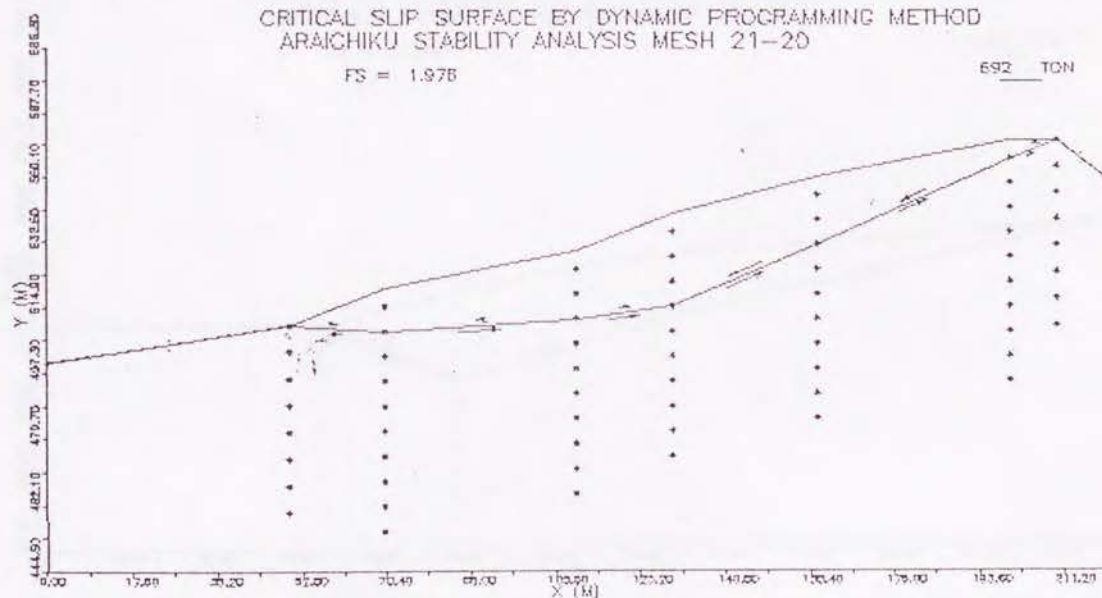
1841 TON

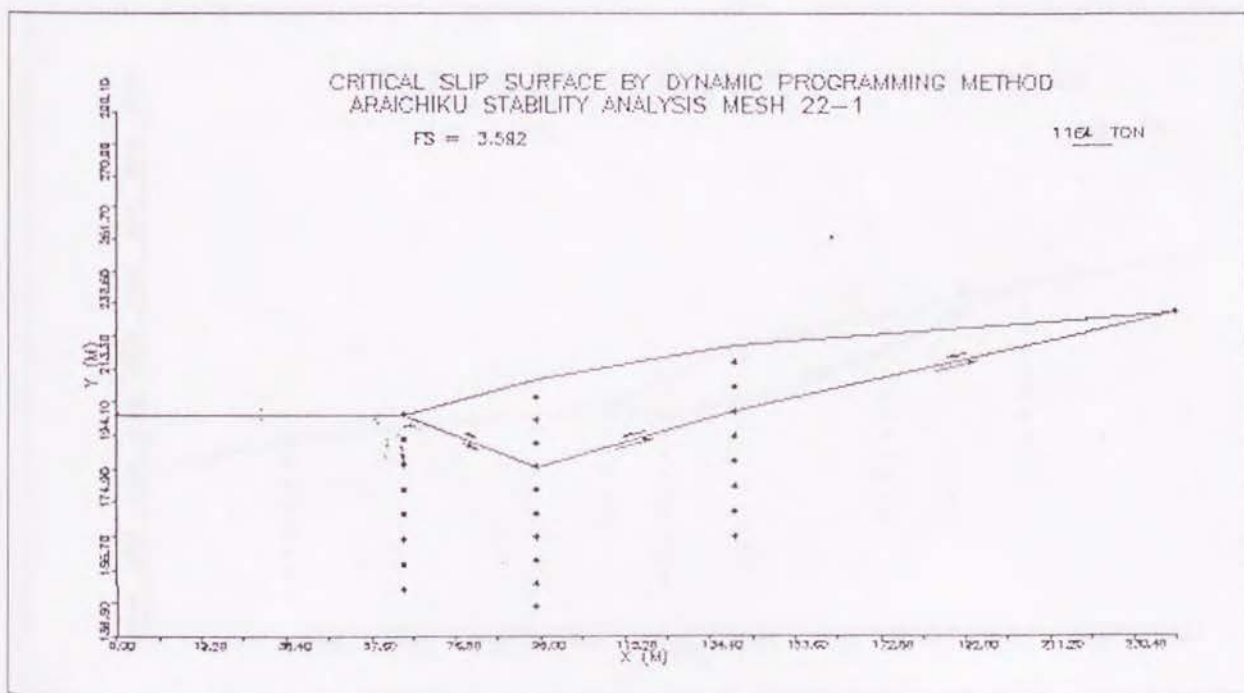
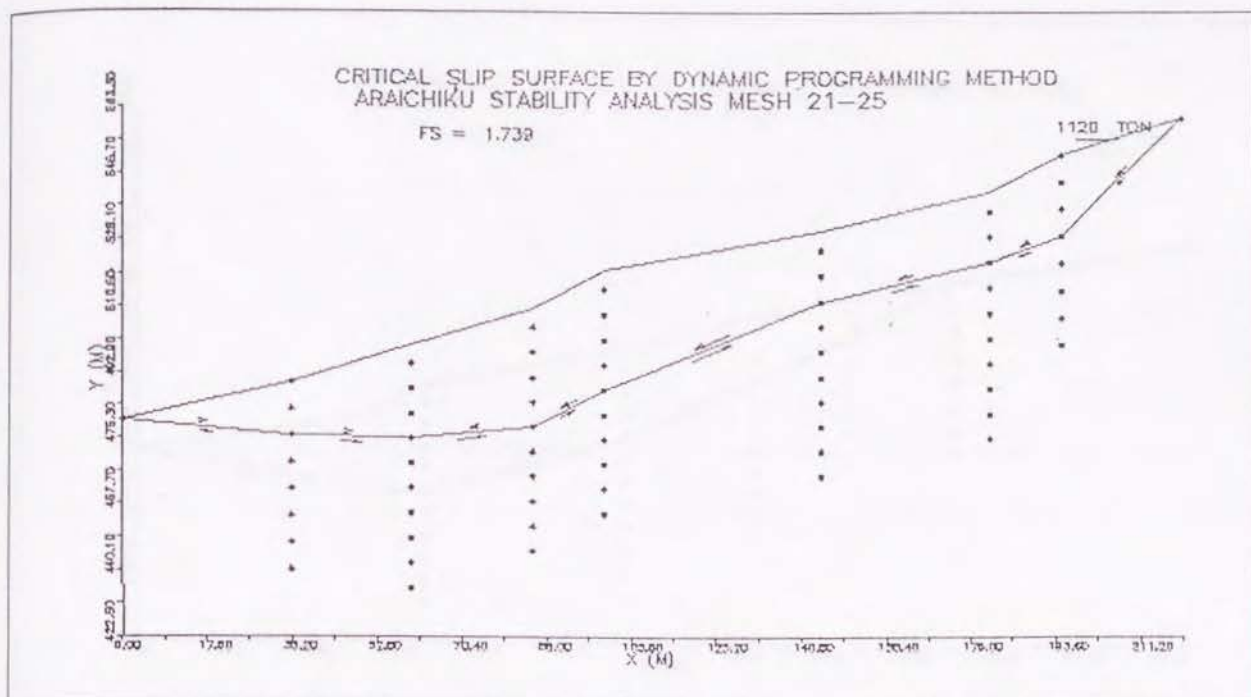


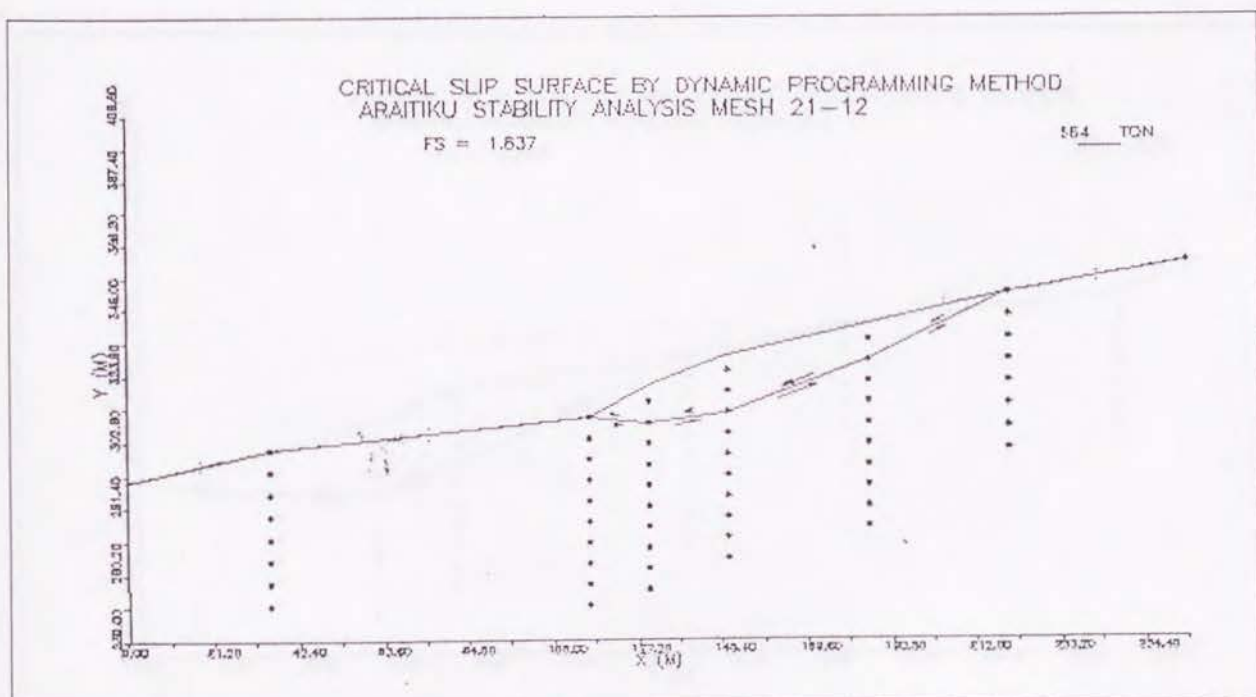
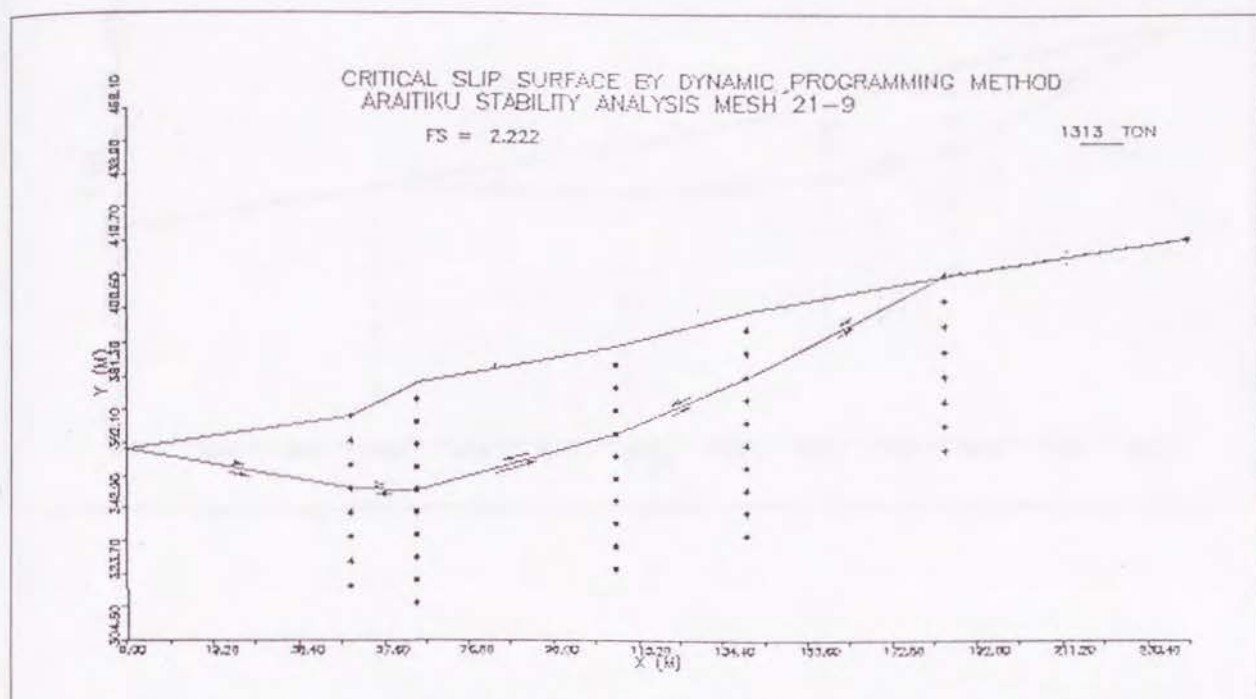
CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 21-20

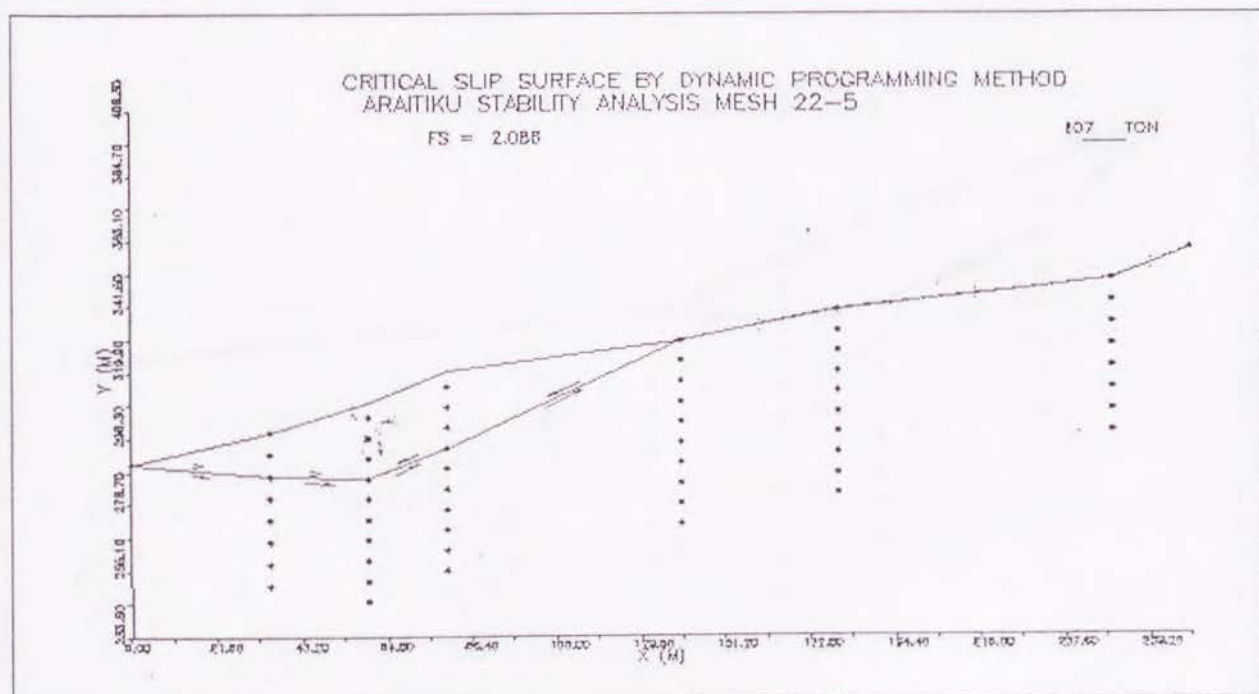
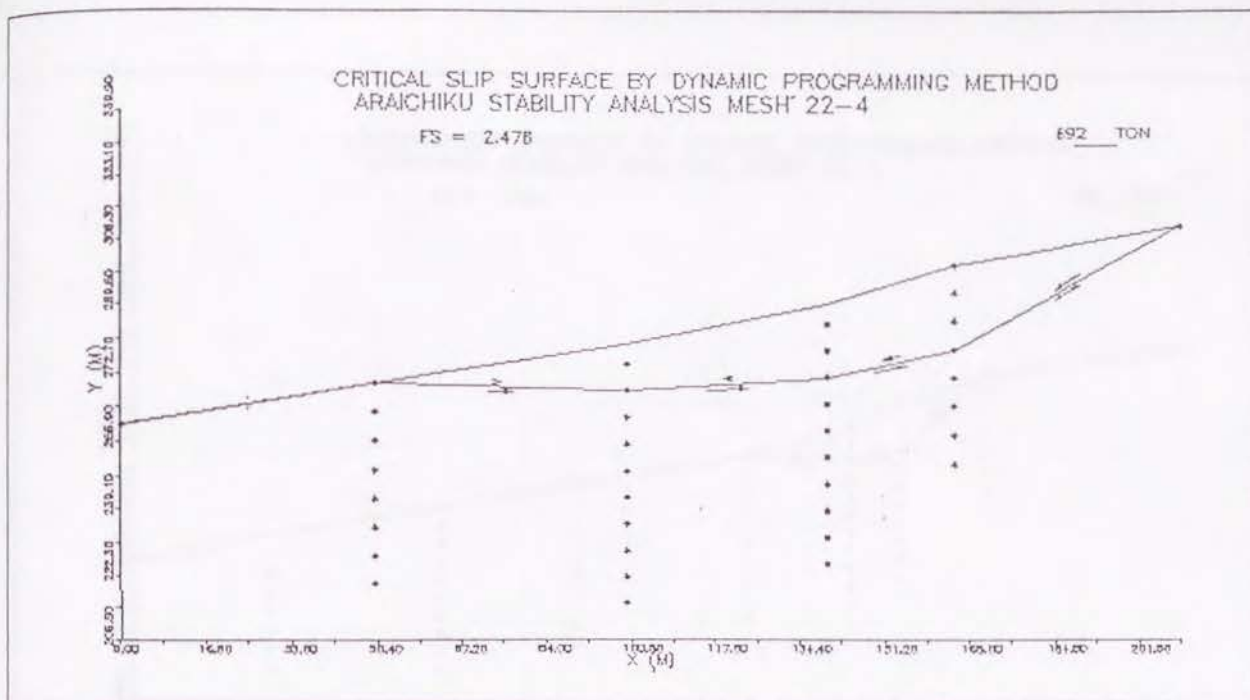
FS = 1.975

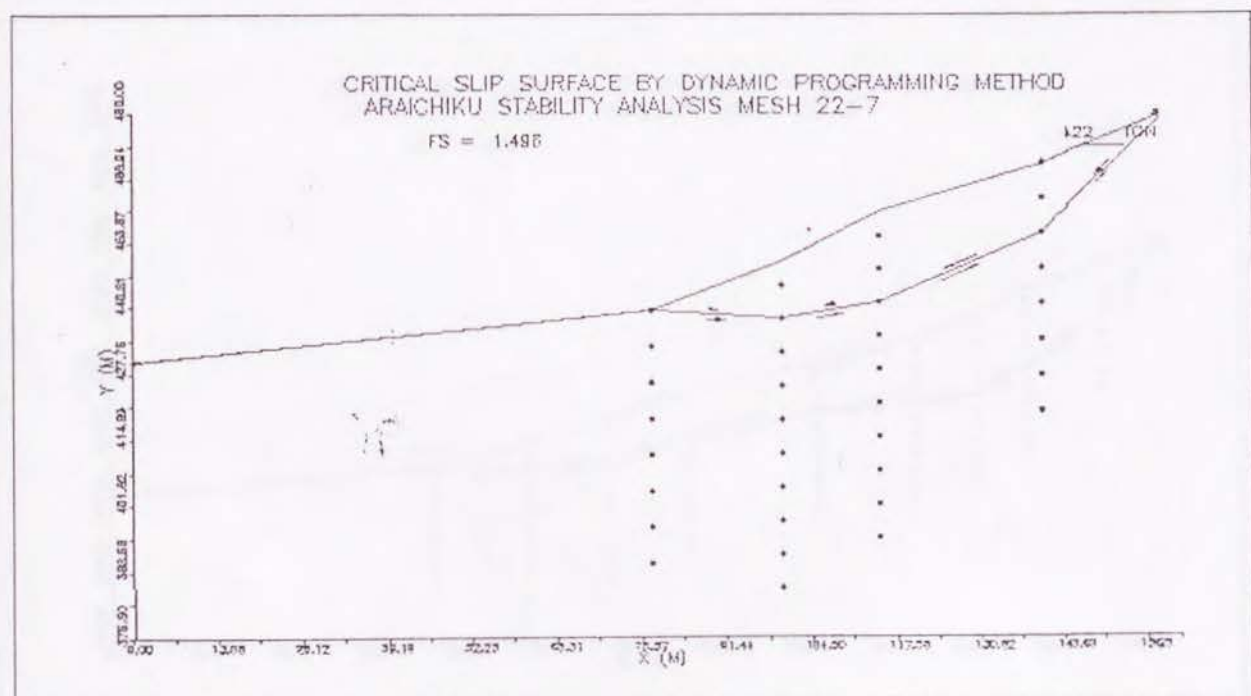
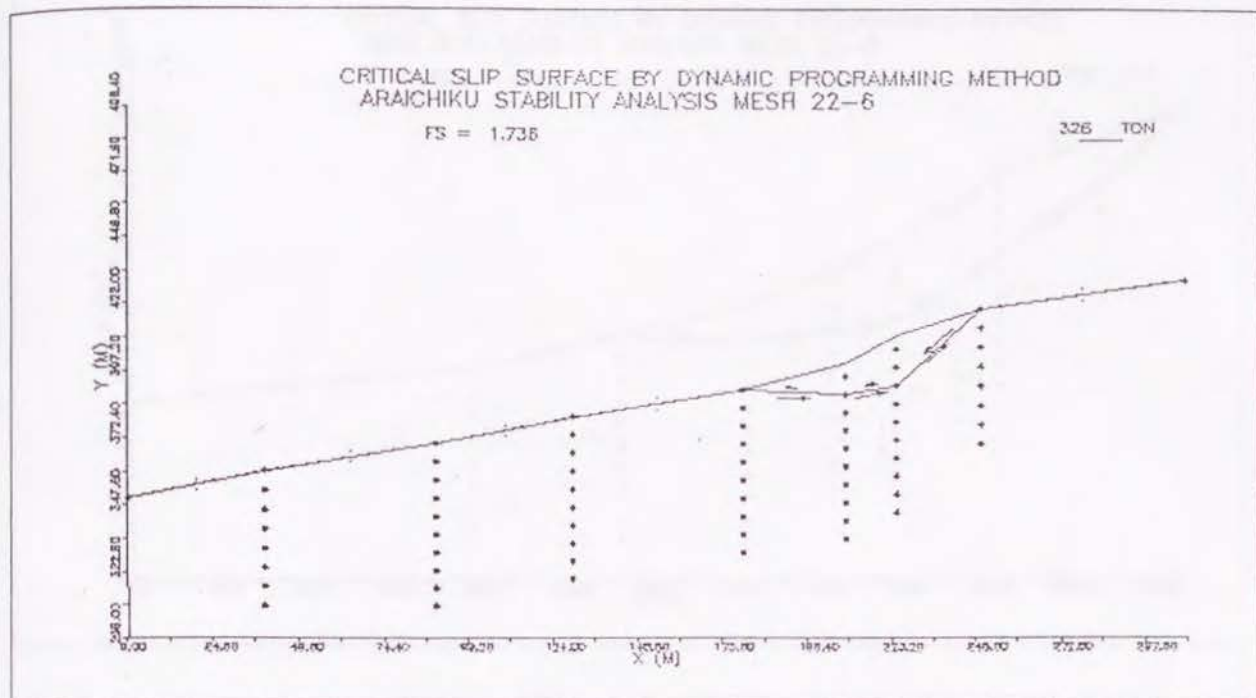
692 TON







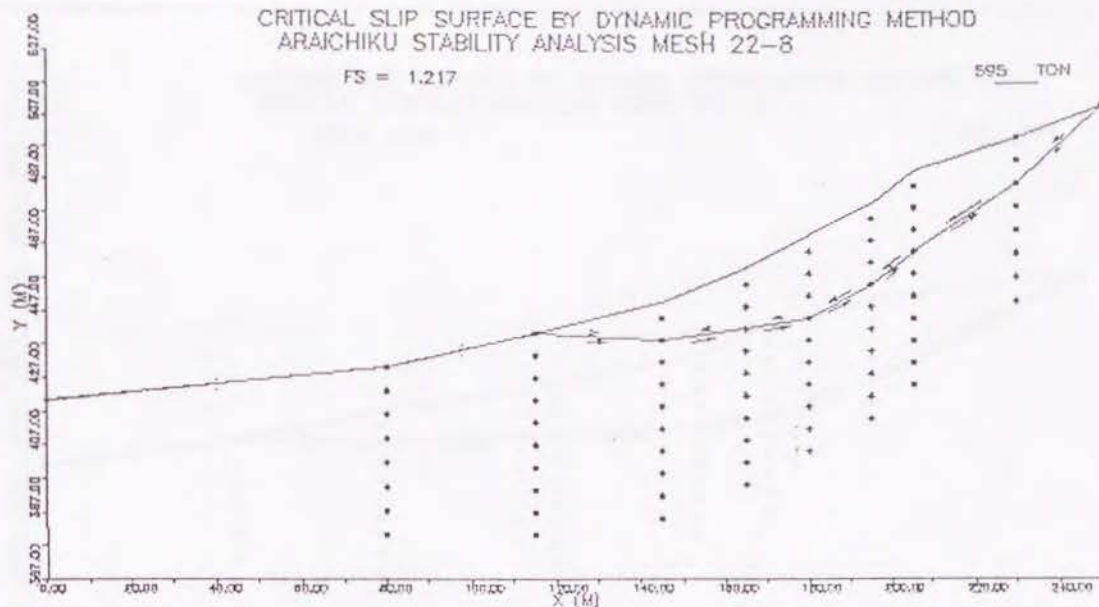




CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 22-8

FS = 1.217

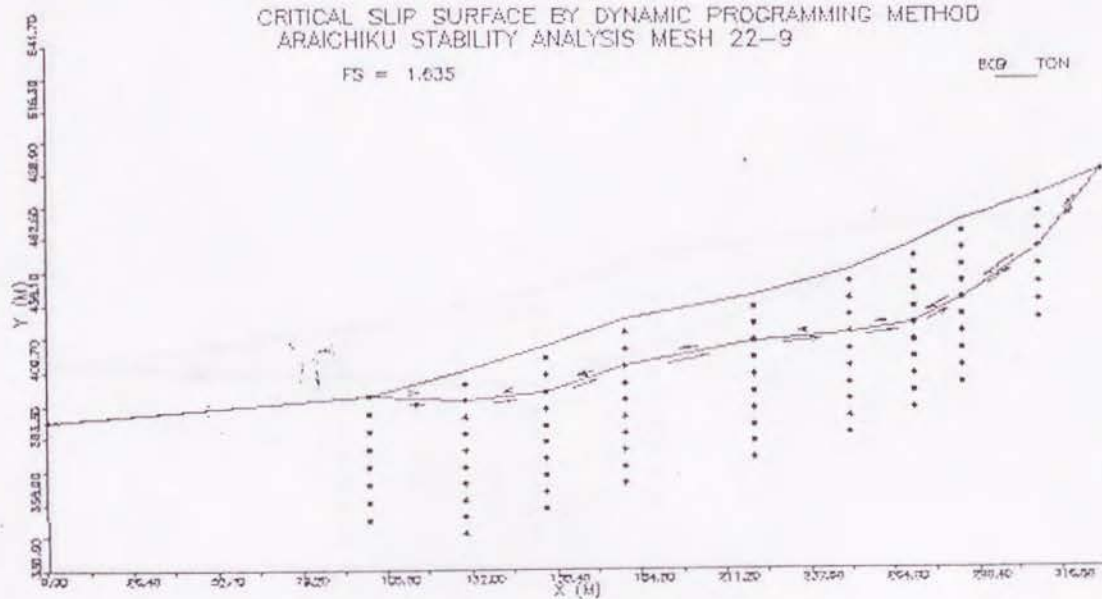
595 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 22-9

FS = 1.635

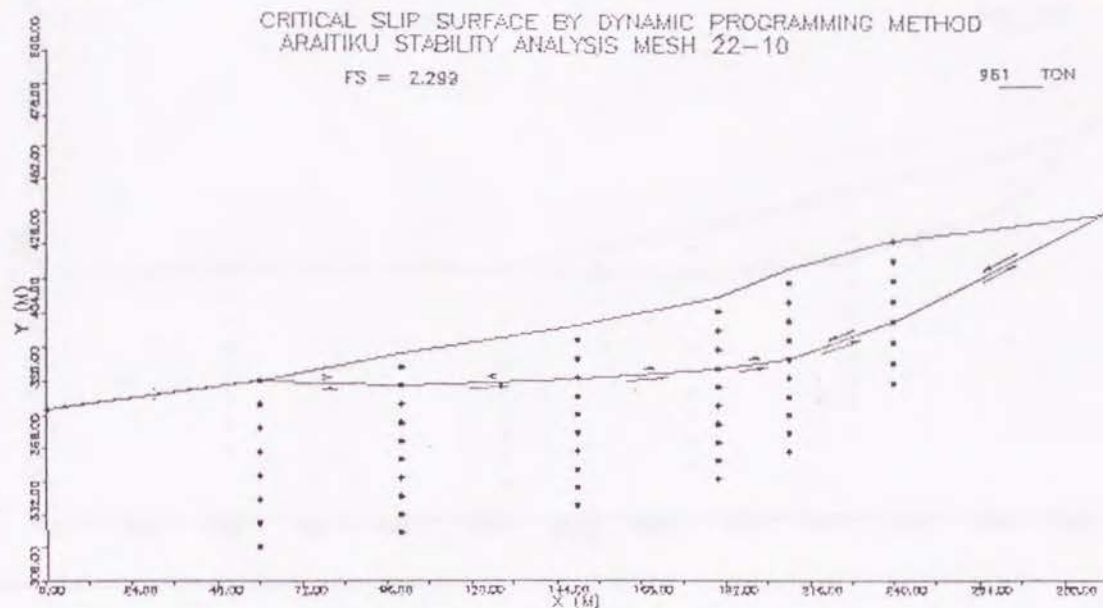
800 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 22-10

FS = 2.292

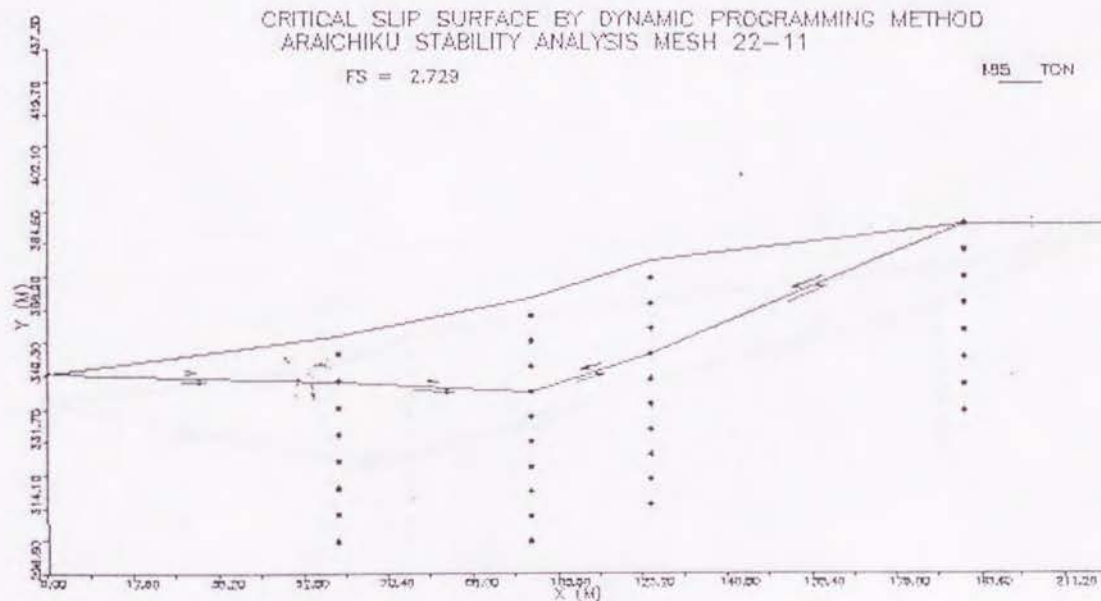
951 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 22-11

FS = 2.723

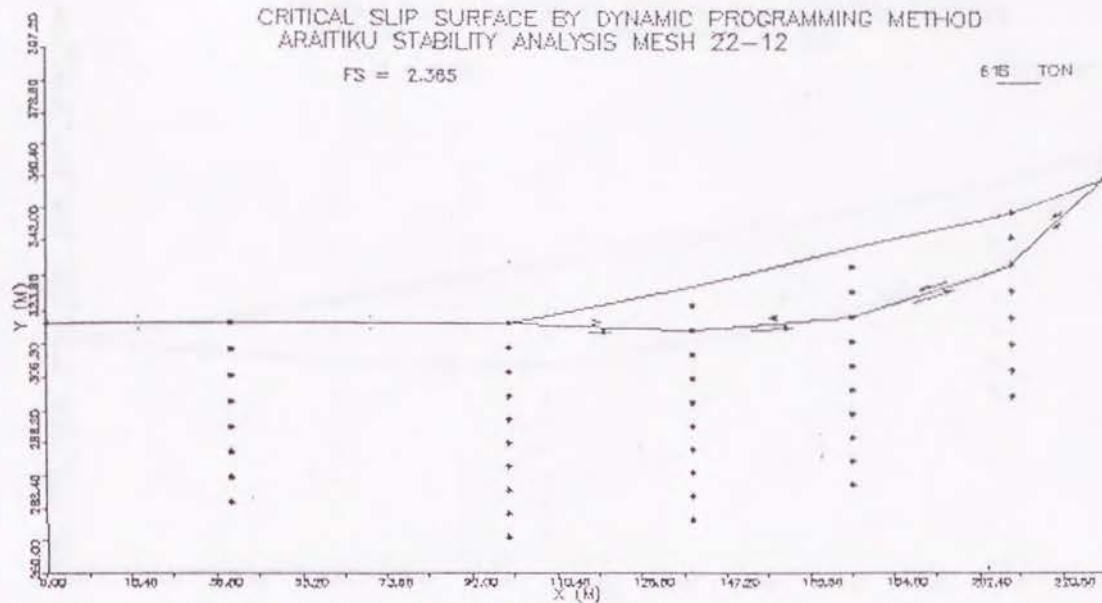
185 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 22-12

FS = 2.385

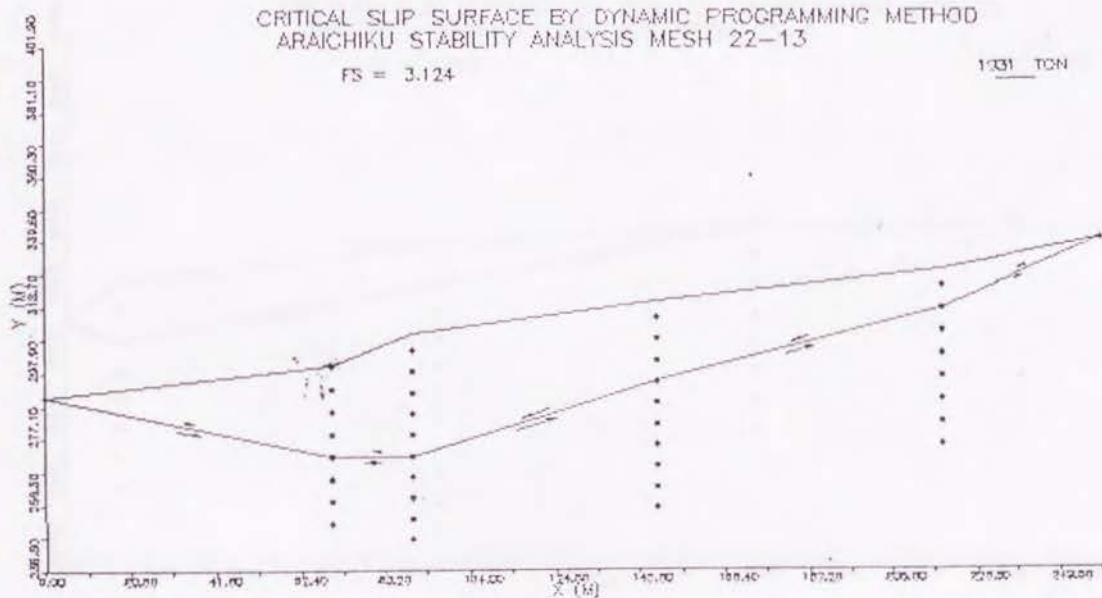
615 TON

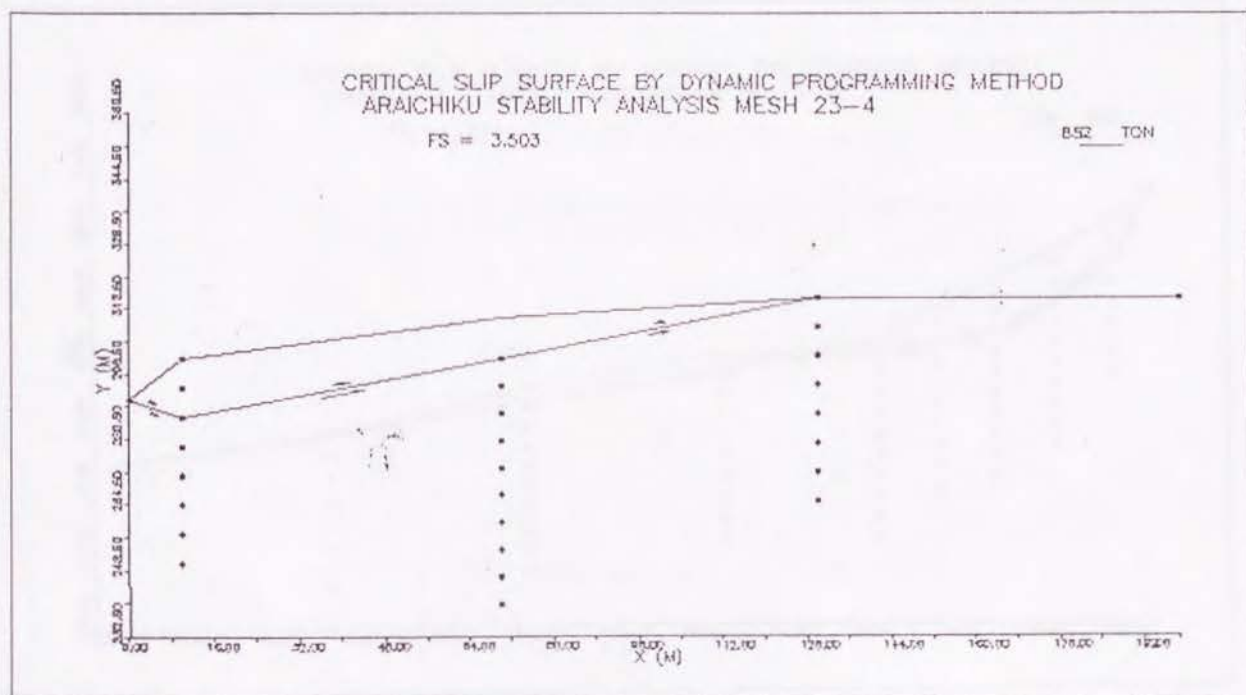
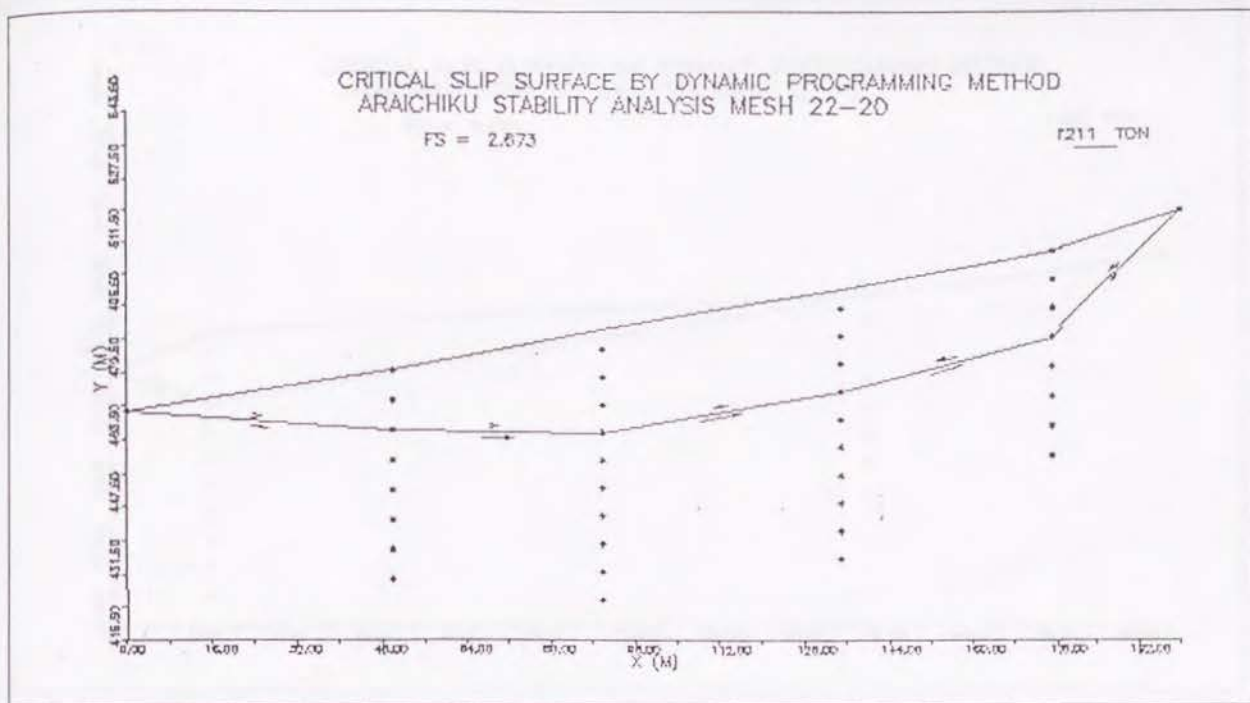


CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 22-13

FS = 3.124

1031 TON

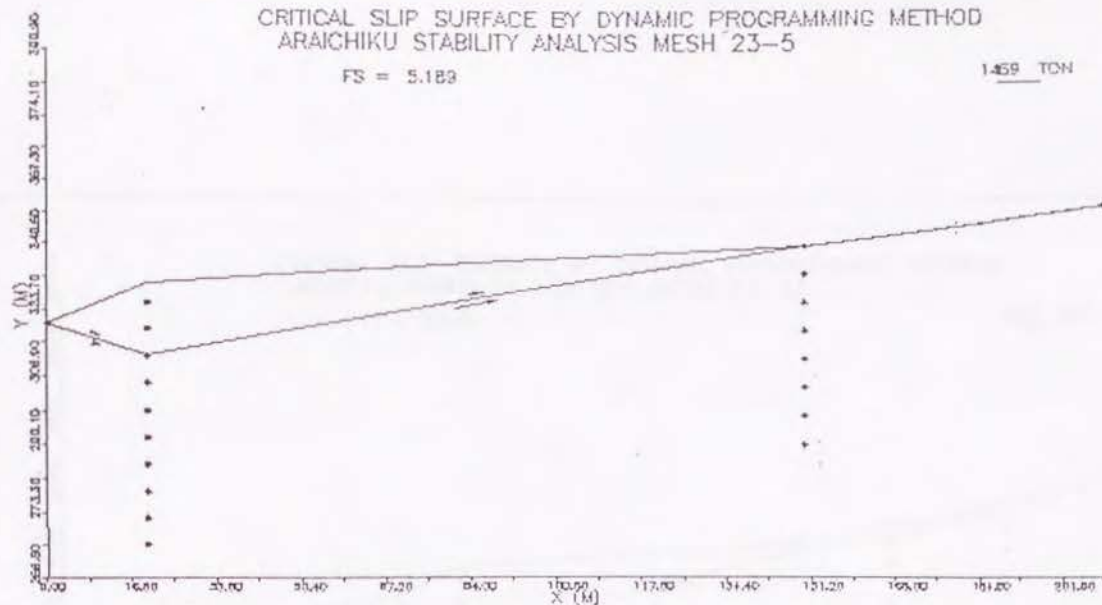




CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 23-5

FS = 5.183

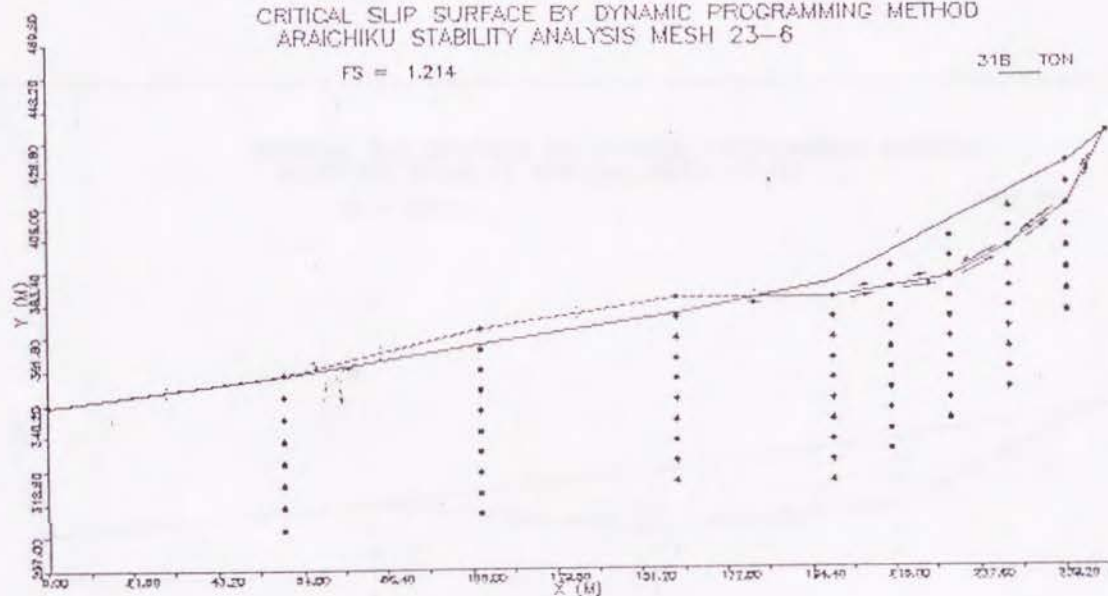
1459 TON

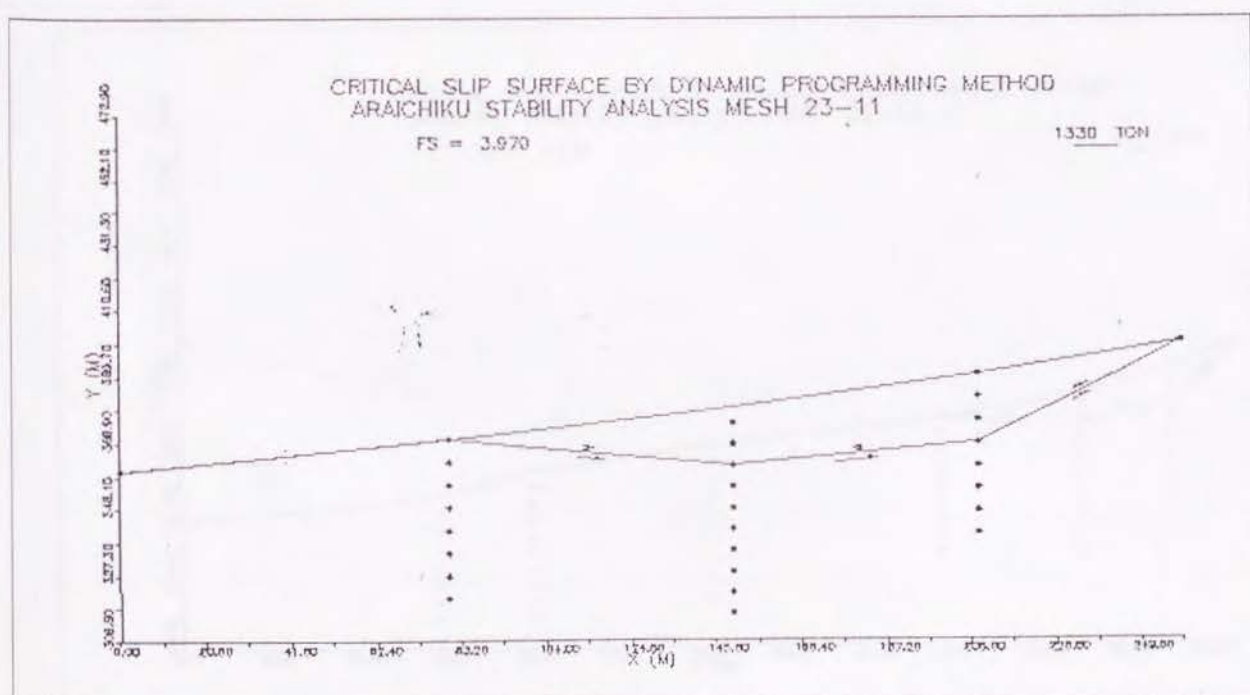
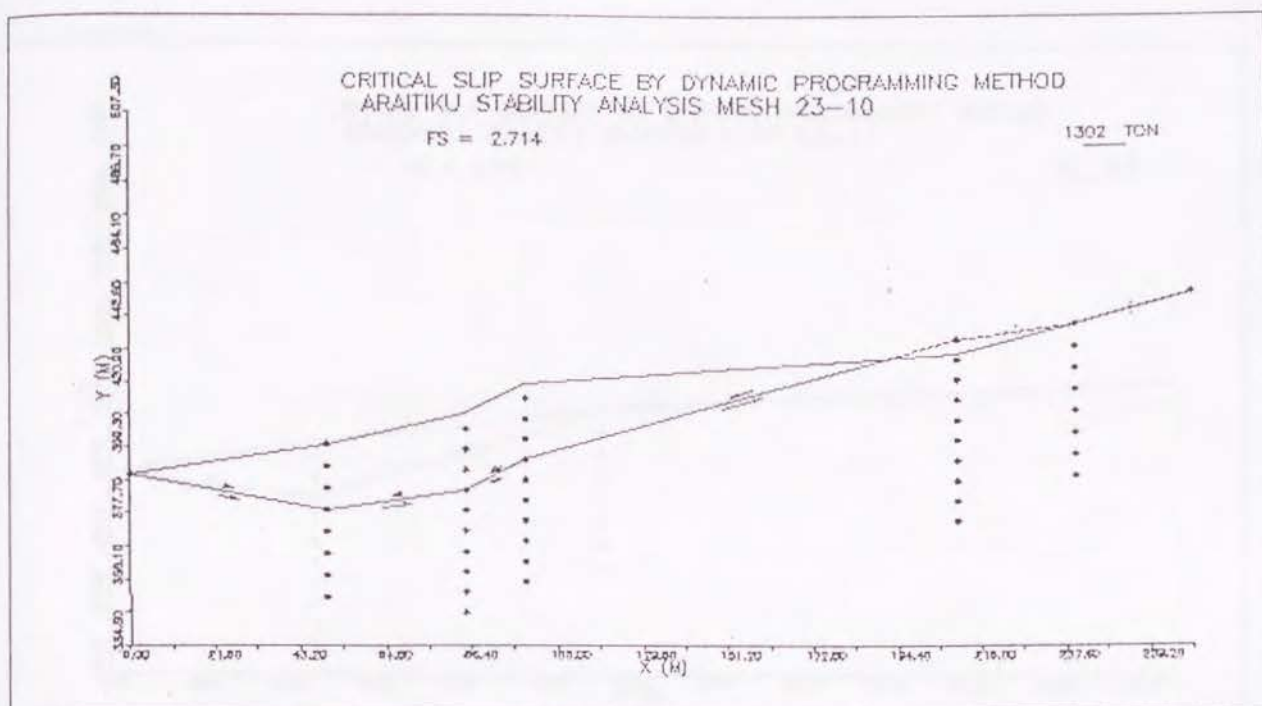


CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 23-6

FS = 1.214

318 TON

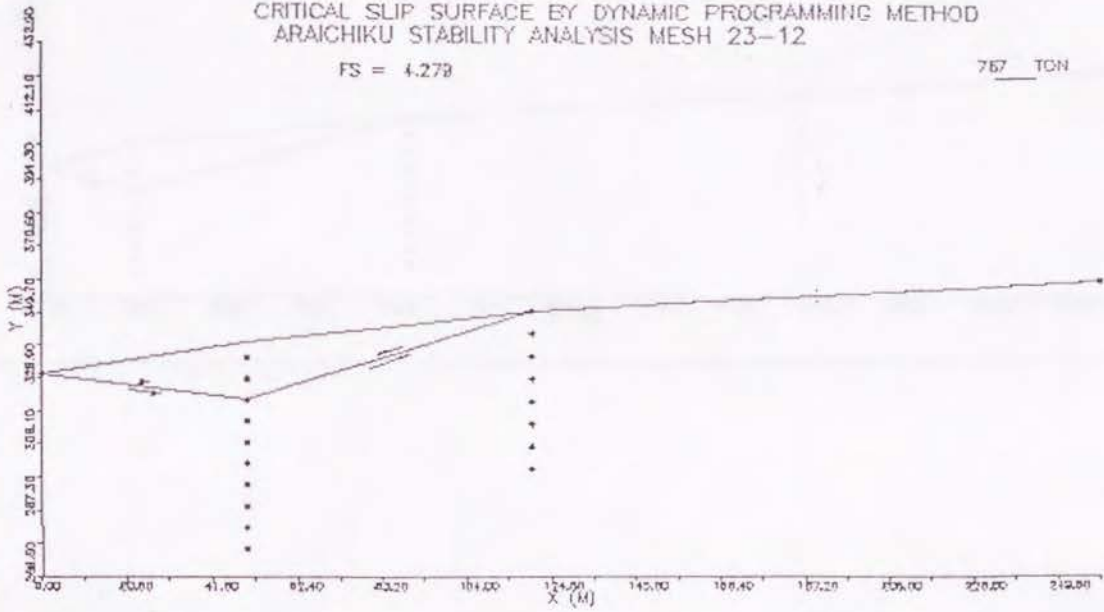




CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 23-12

FS = 4.273

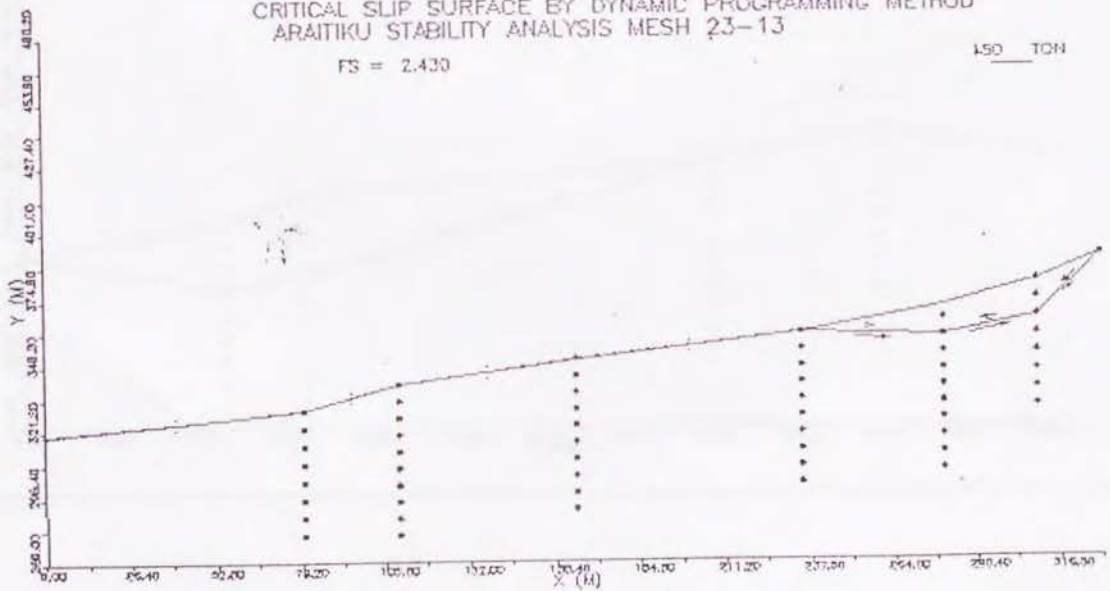
767 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 23-13

FS = 2.430

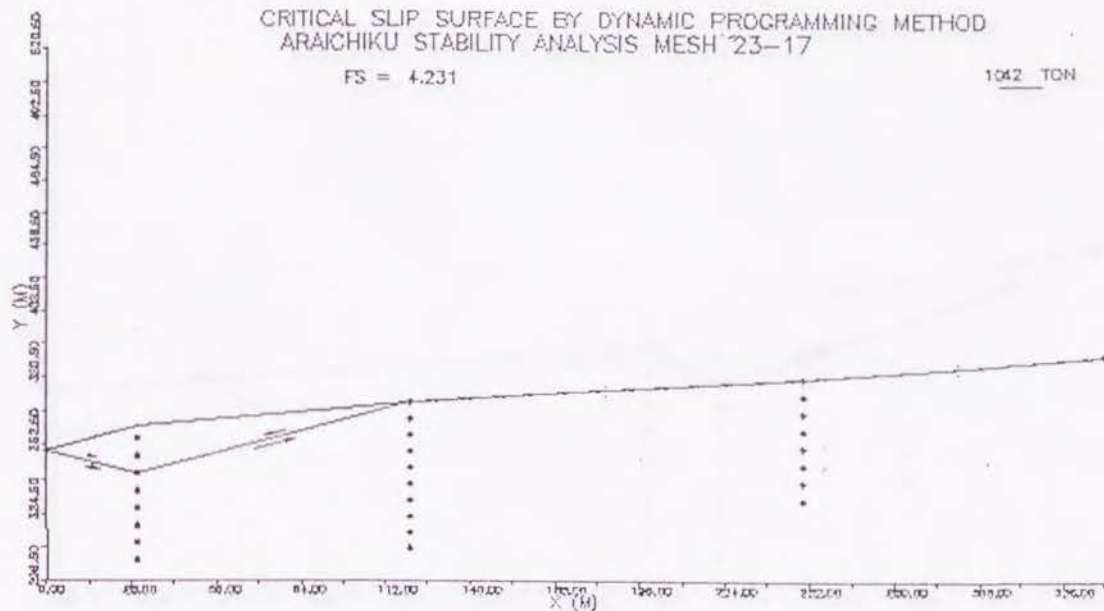
150 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 23-17

FS = 4.231

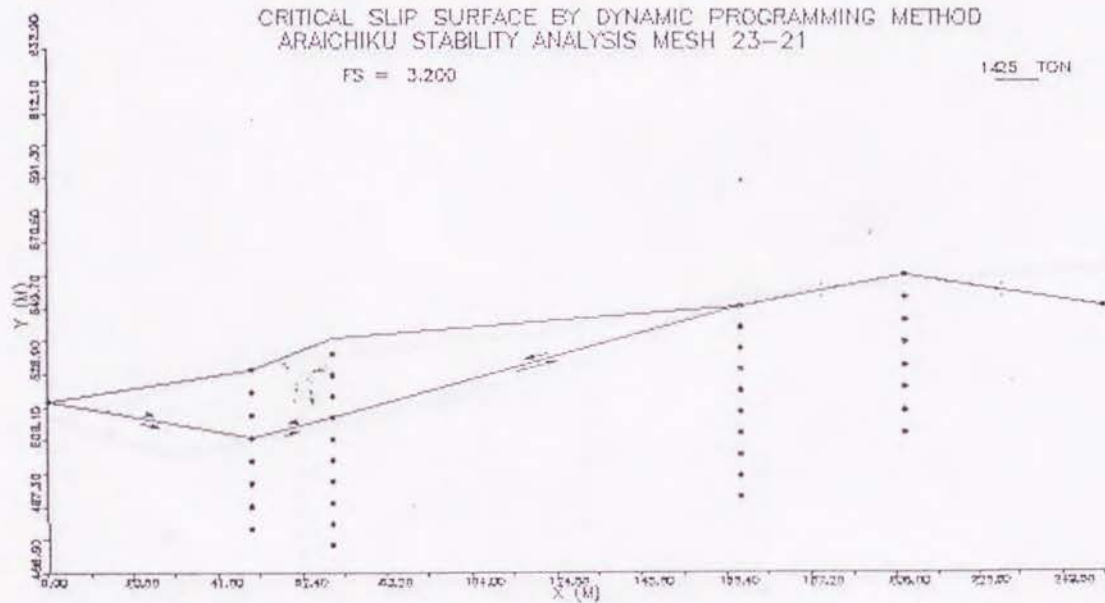
1042 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 23-21

FS = 3.200

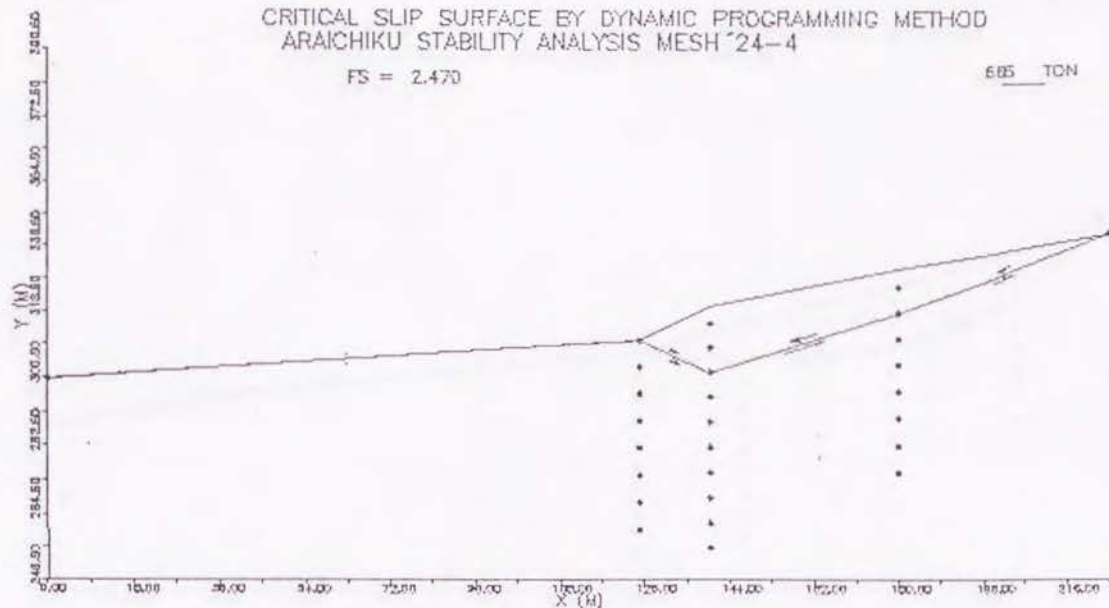
1425 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 24-4

FS = 2.470

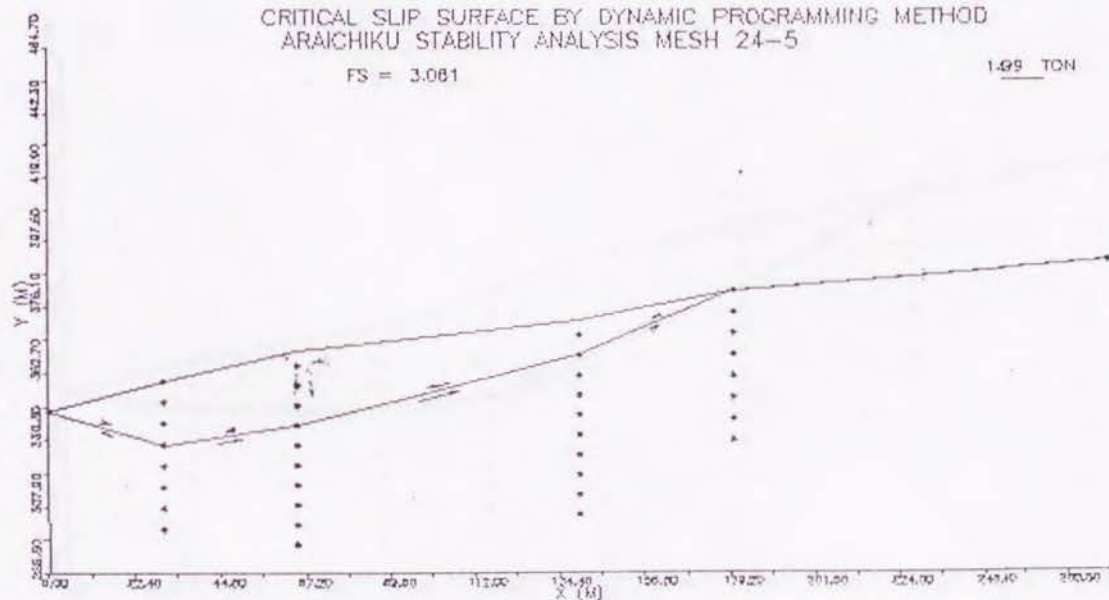
685 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 24-5

FS = 3.081

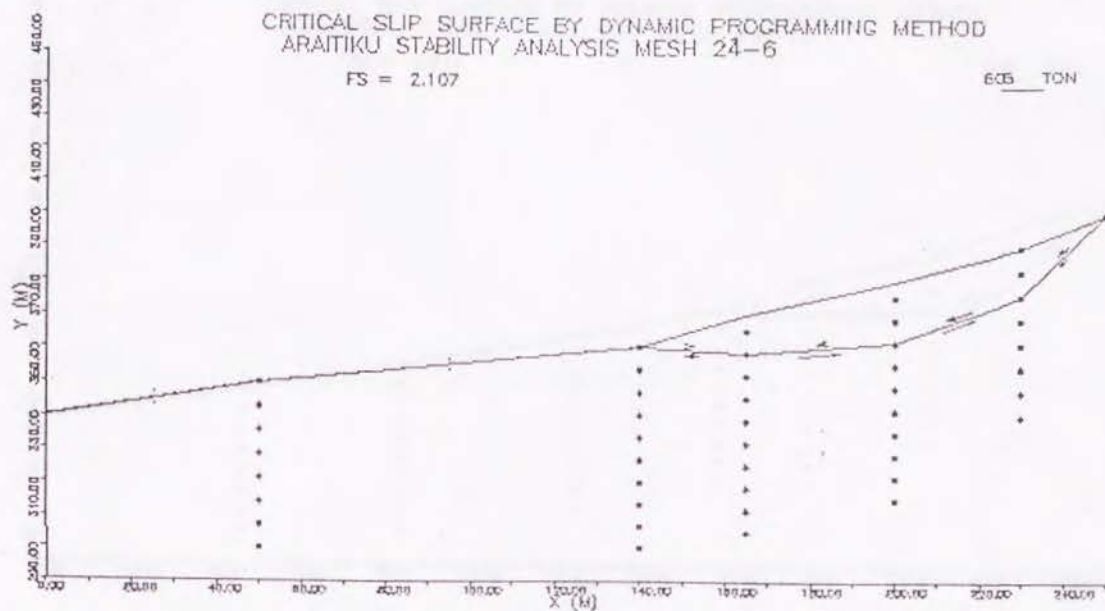
1.499 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 24-6

FS = 2.107

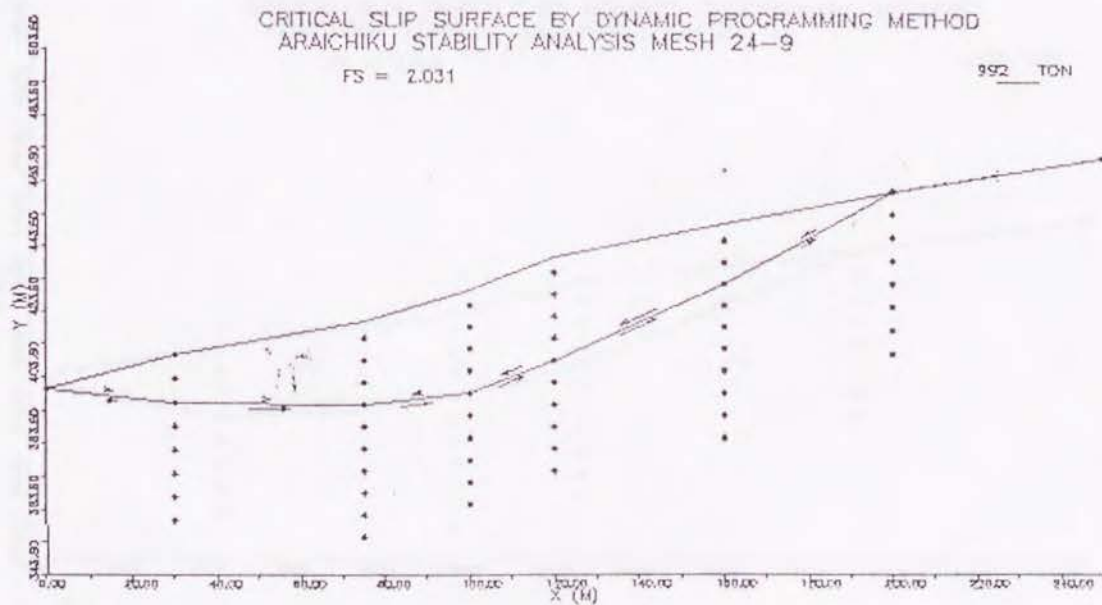
605 TON

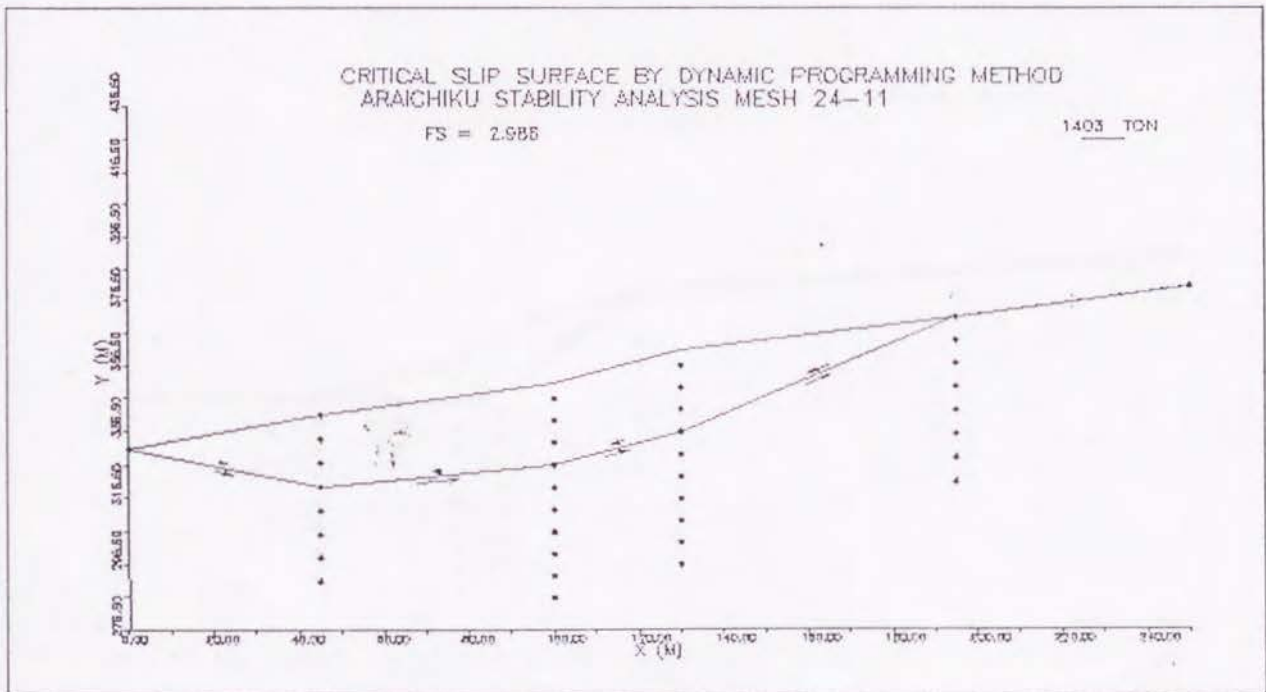
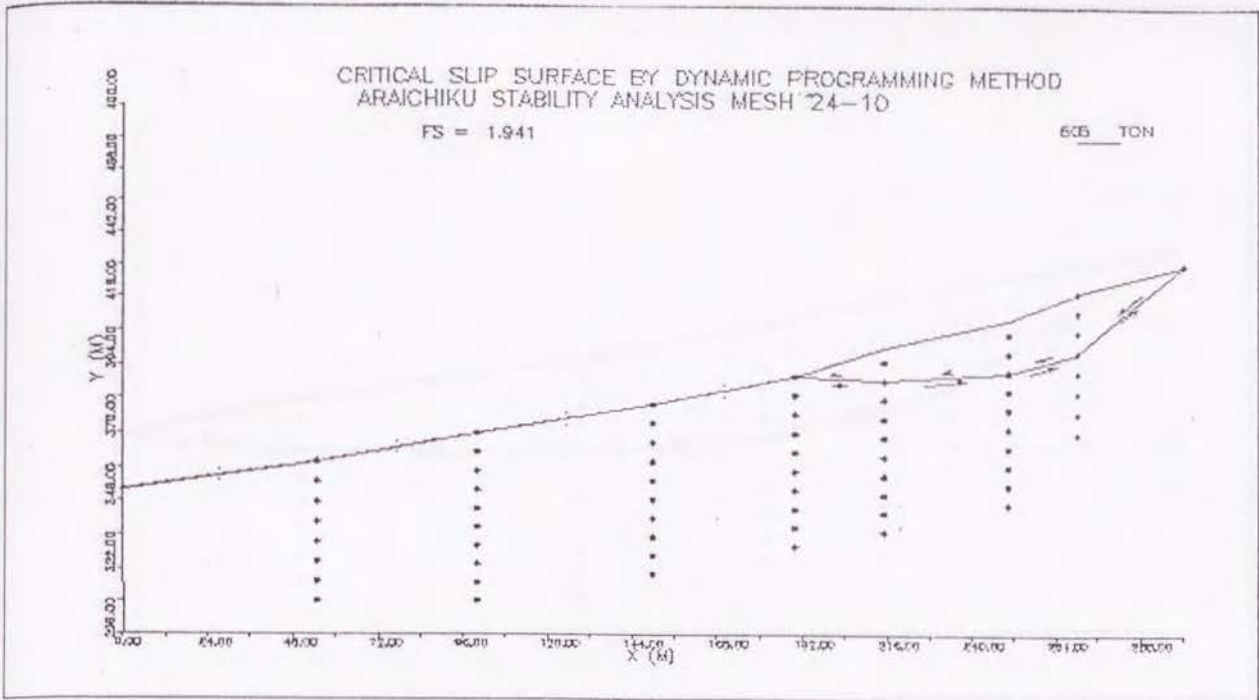


CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAIKIKU STABILITY ANALYSIS MESH 24-9

FS = 2.031

992 TON

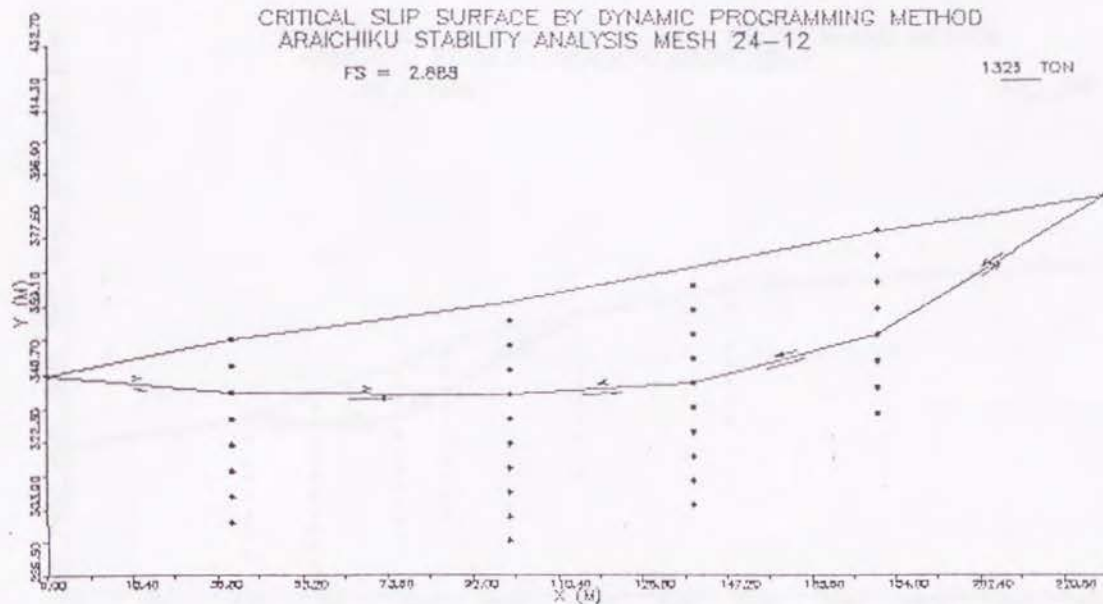




CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 24-12

FS = 2.883

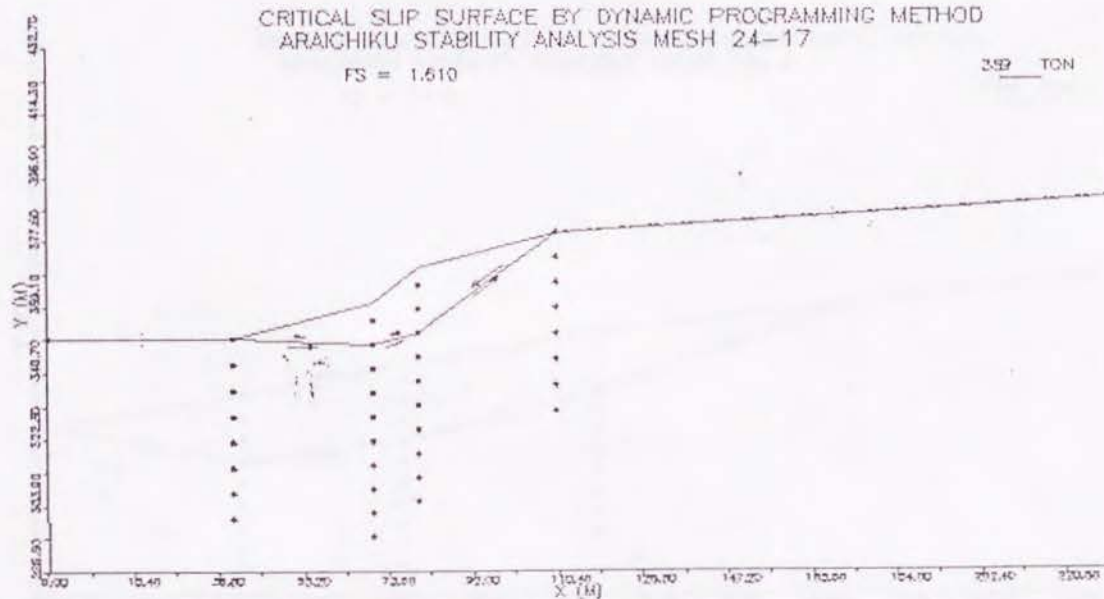
1323 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 24-17

FS = 1.610

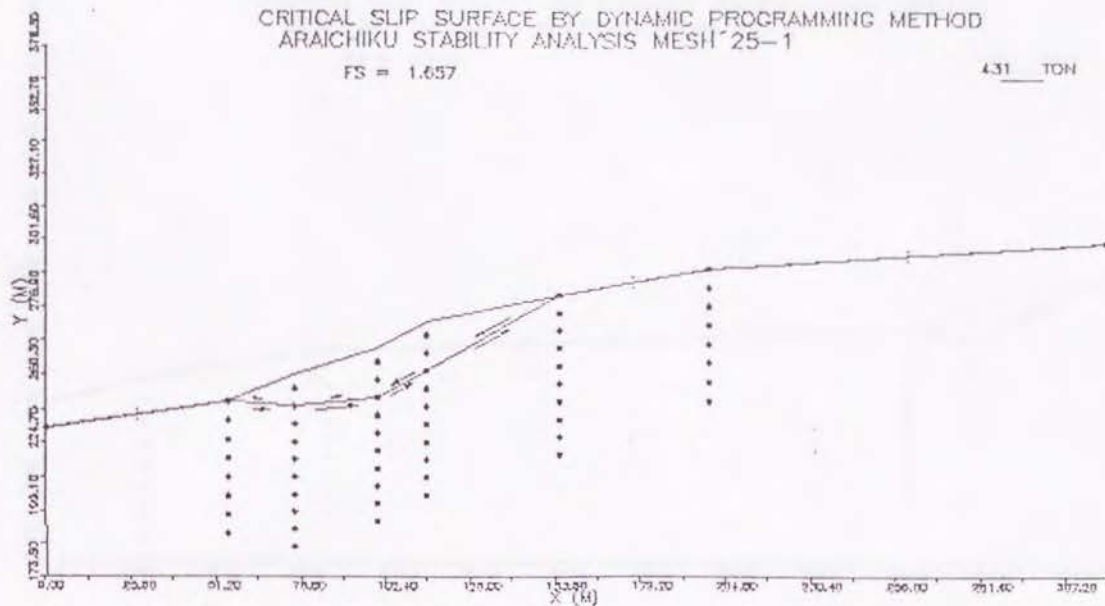
359 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 25-1

FS = 1.657

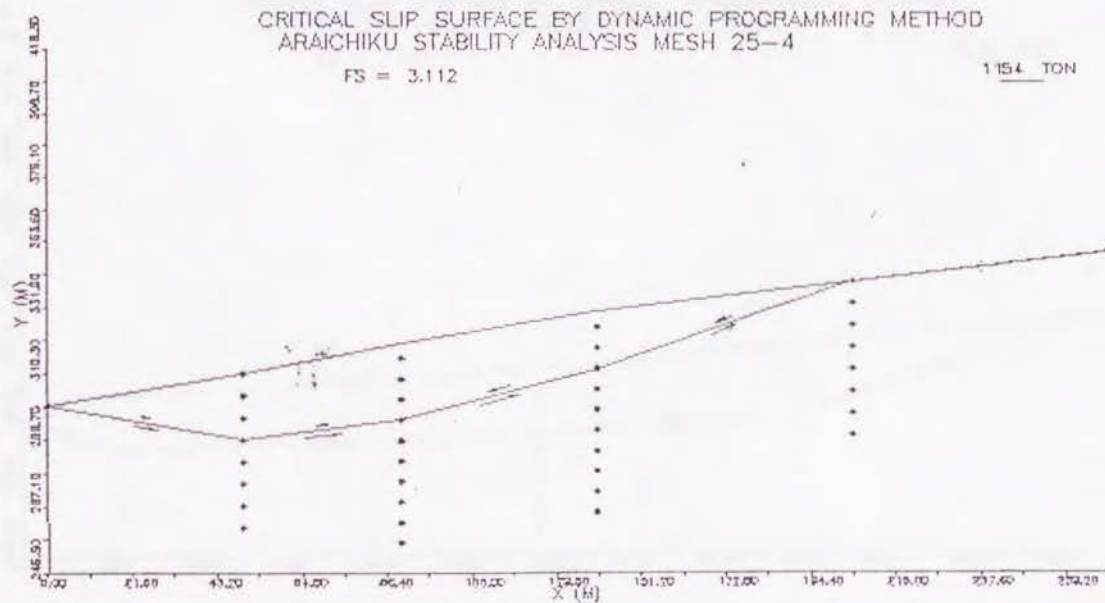
431 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 25-4

FS = 3.112

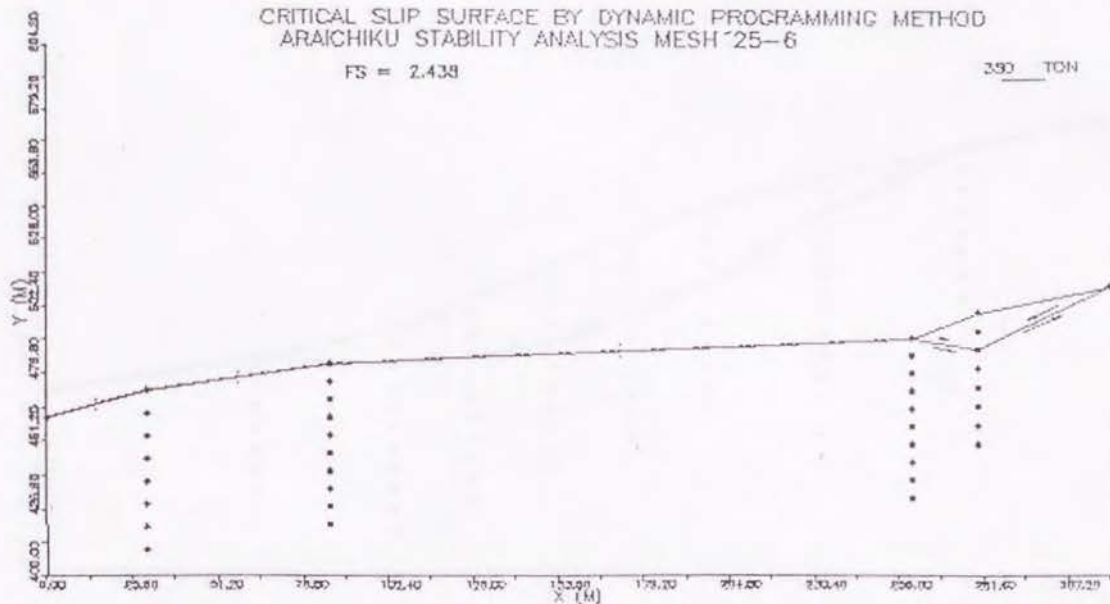
1154 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 25-6

FS = 2.438

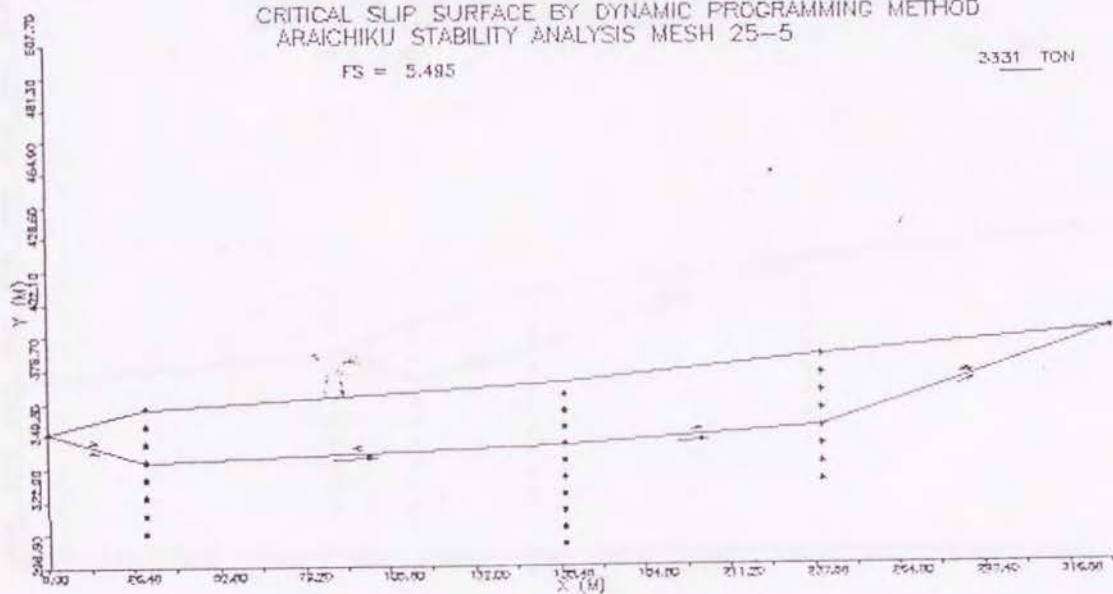
330 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 25-5

FS = 5.485

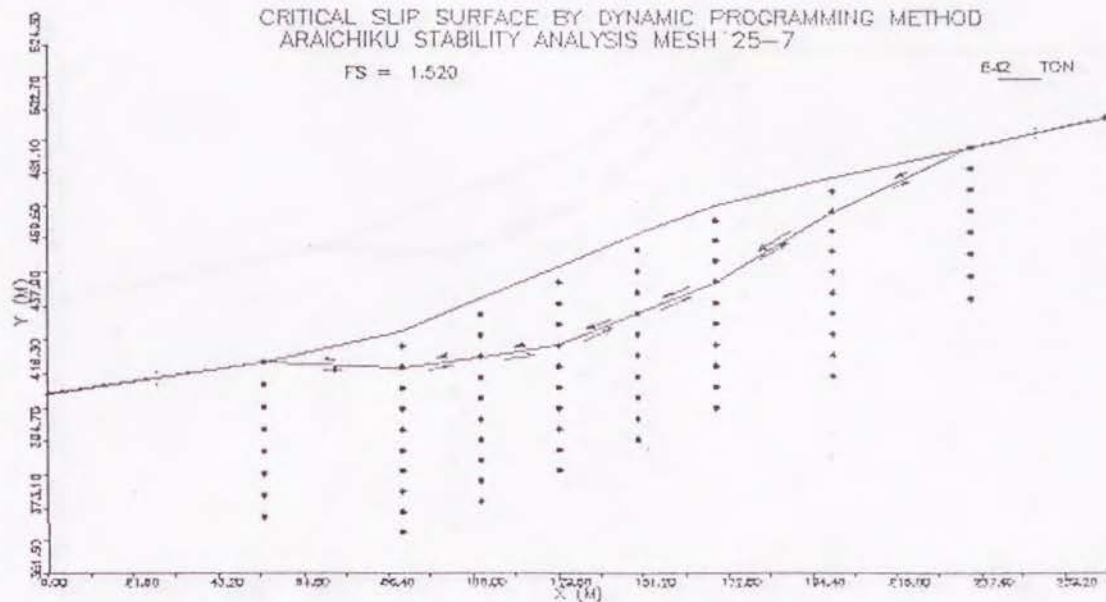
3331 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 25-7

FS = 1.520

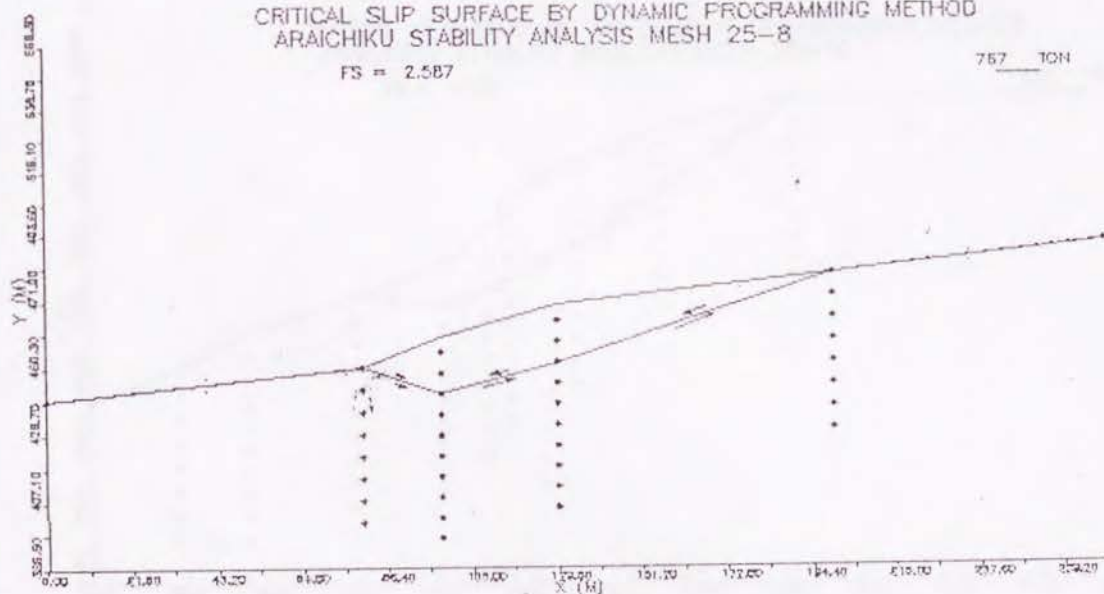
6.0 TON

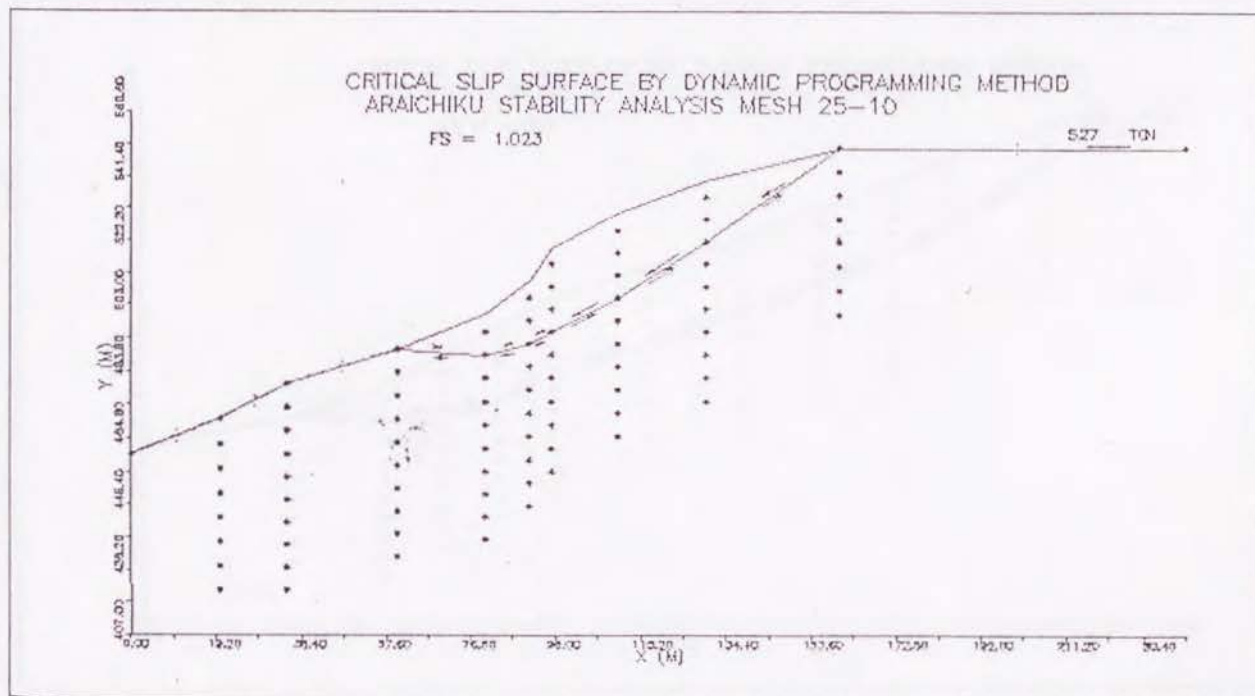
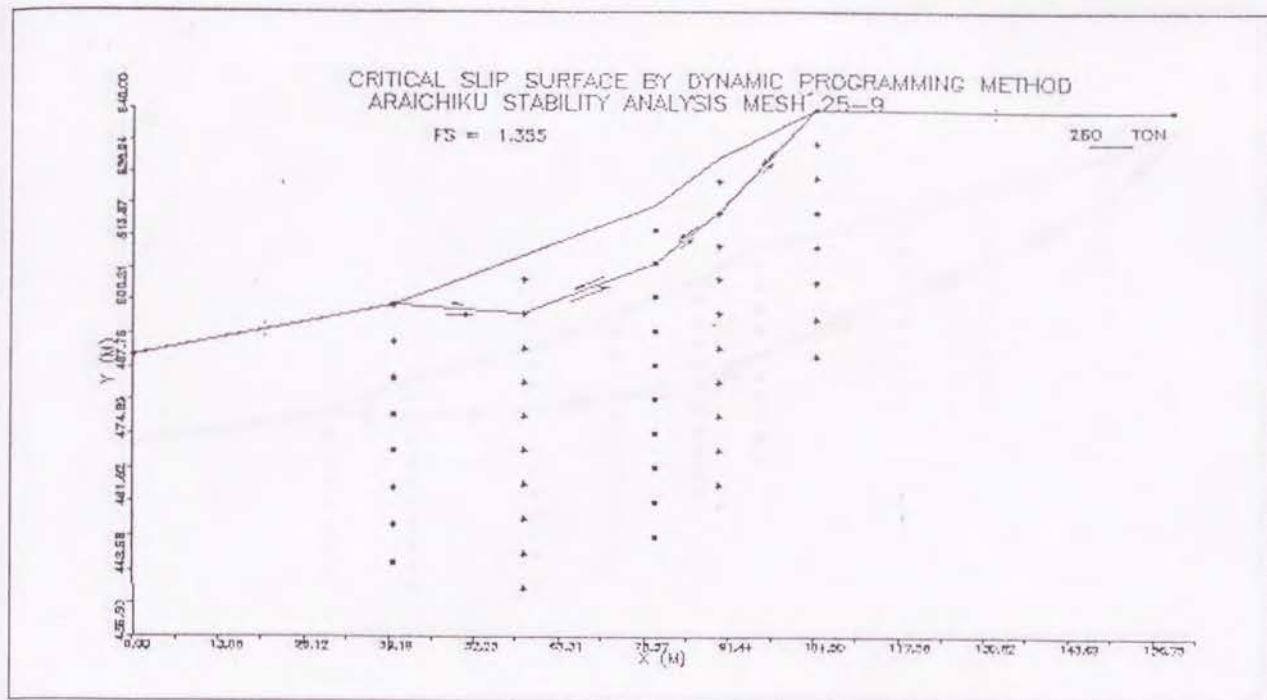


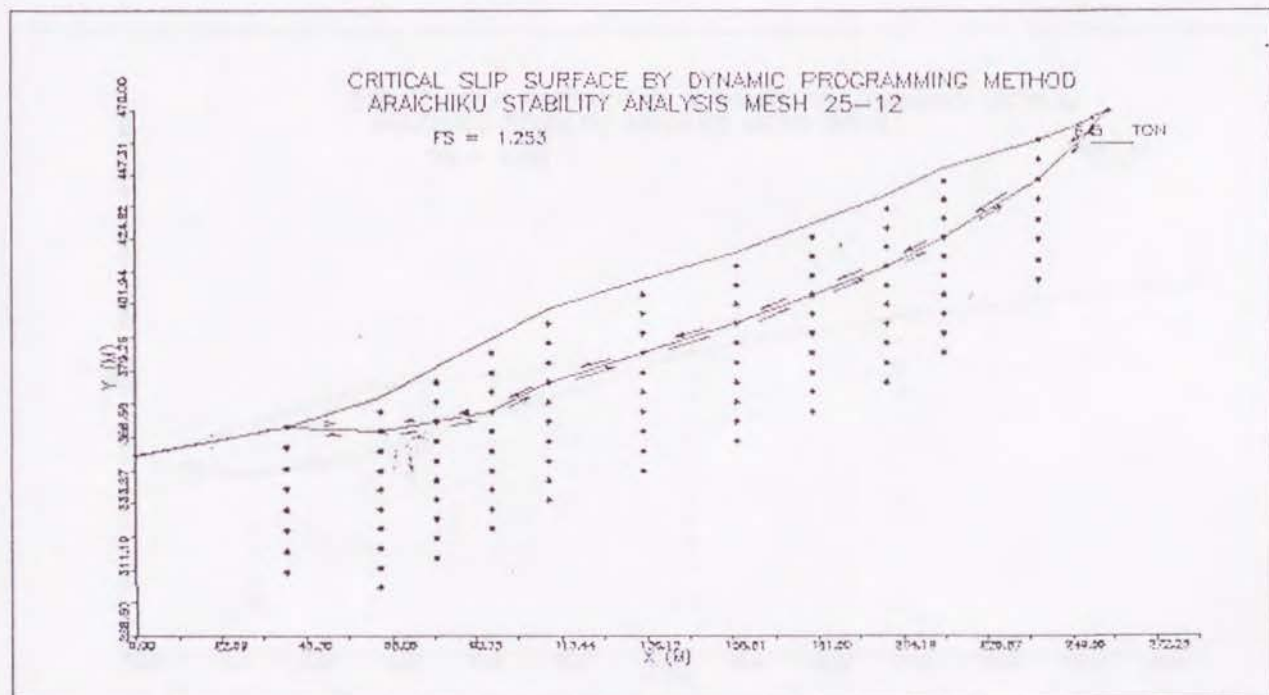
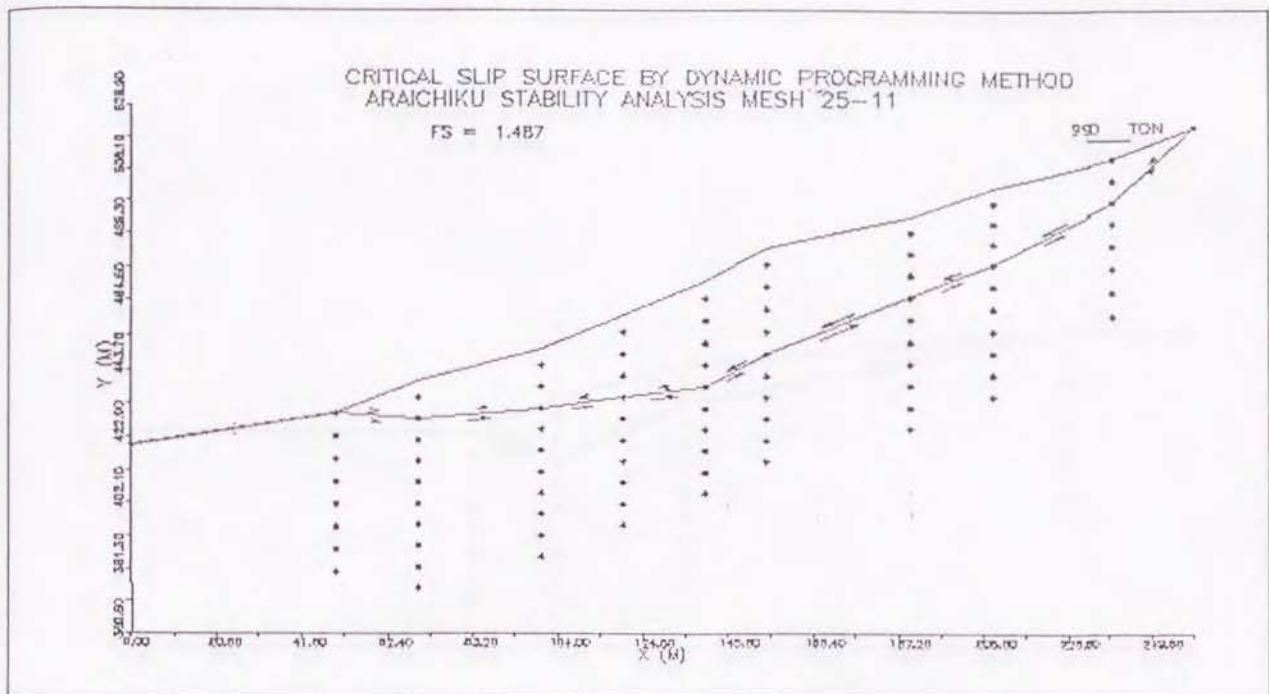
CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 25-8

FS = 2.587

757 TON



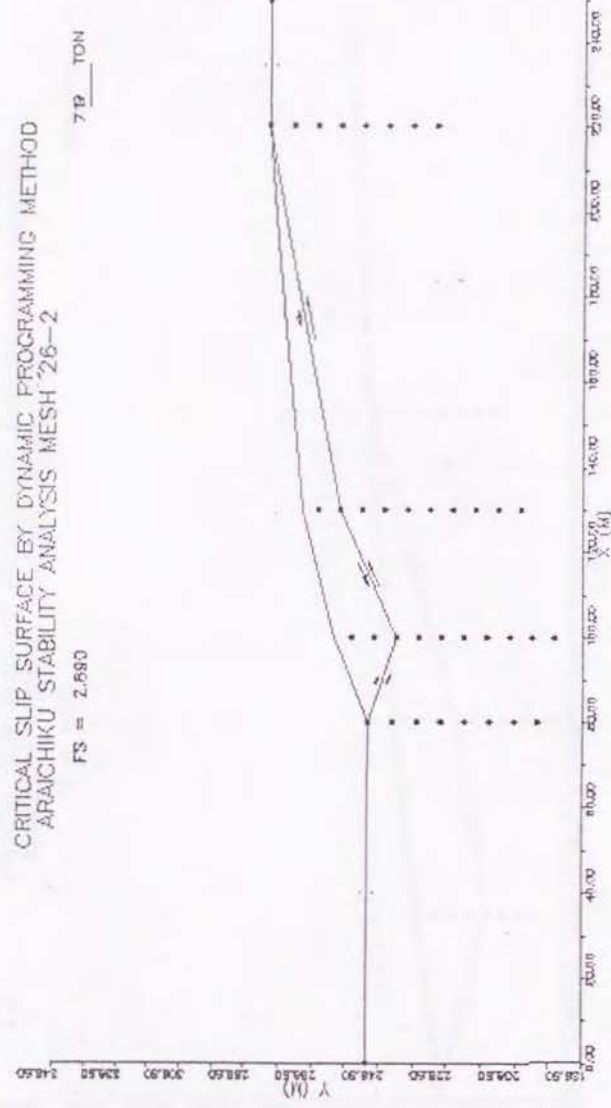




CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 26-2

FS = 2.690

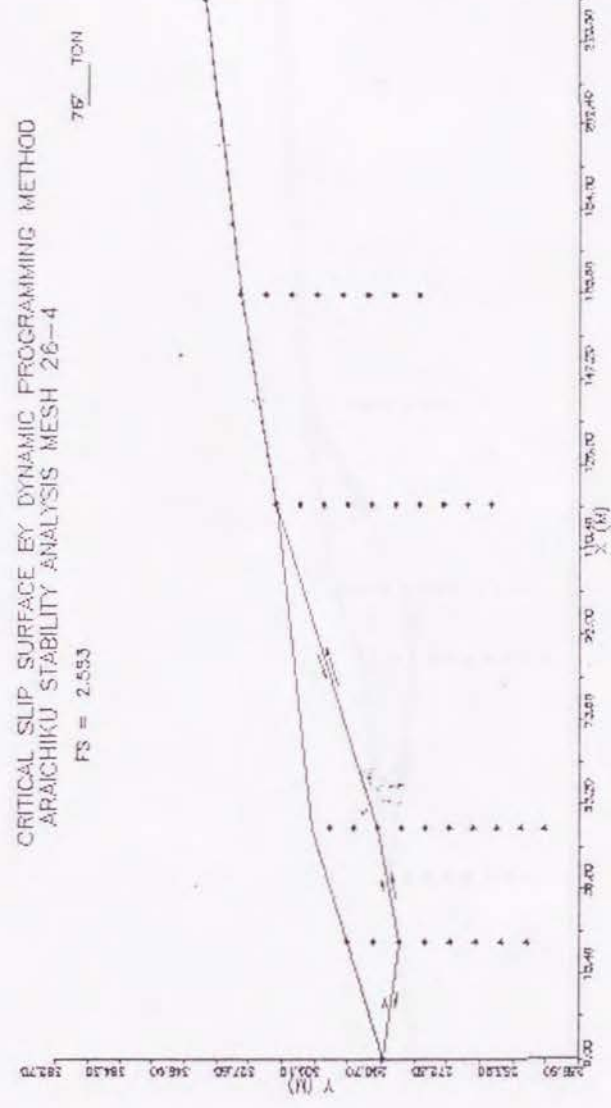
719 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 26-4

FS = 2.553

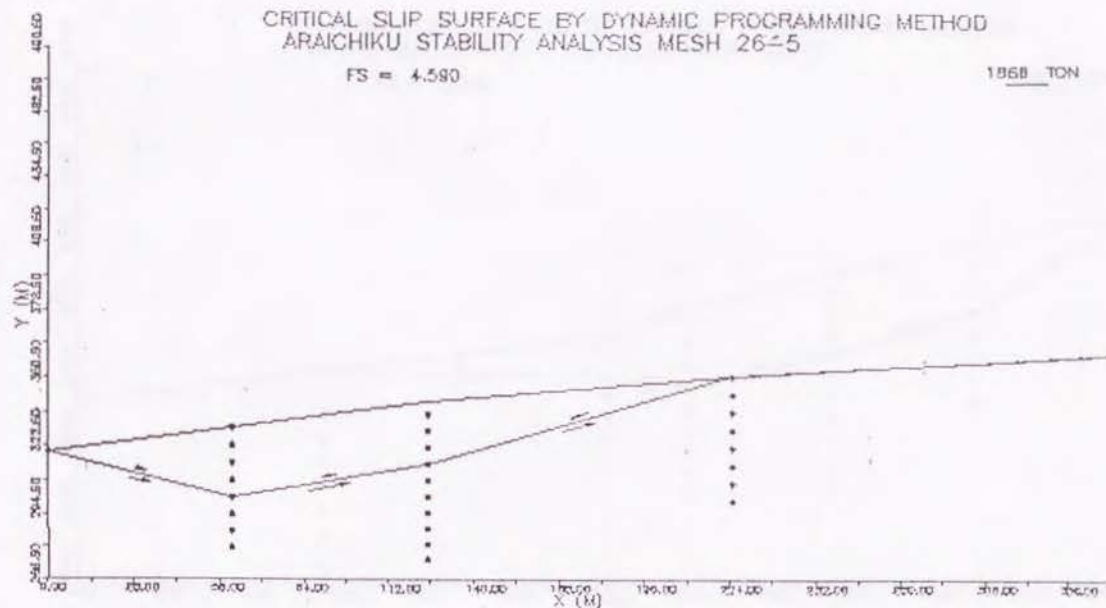
767 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 26-5

FS = 4.580

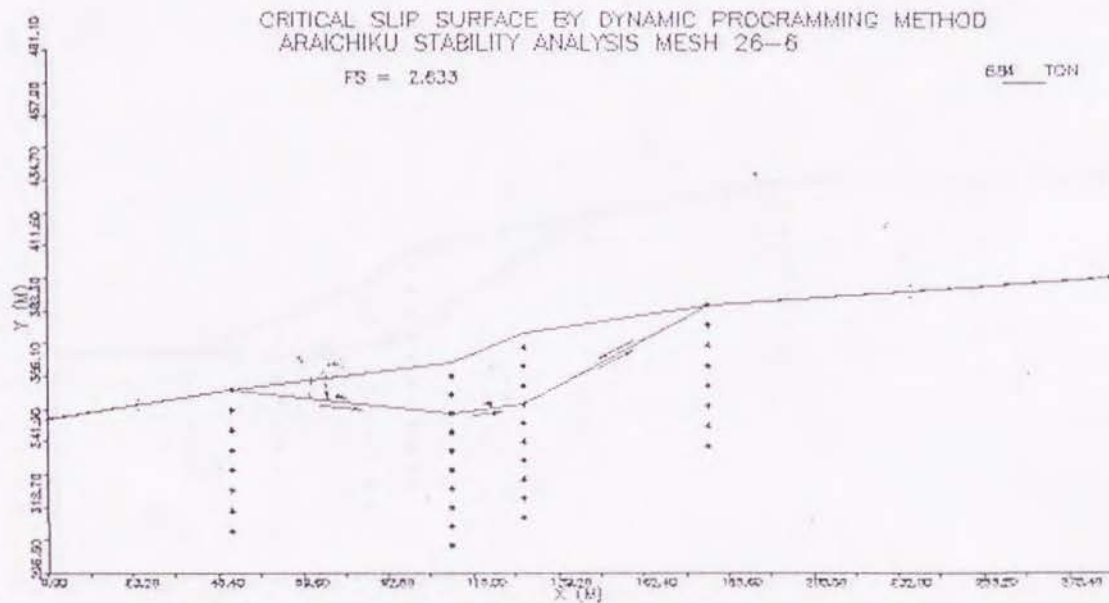
1958 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 26-6

FS = 2.633

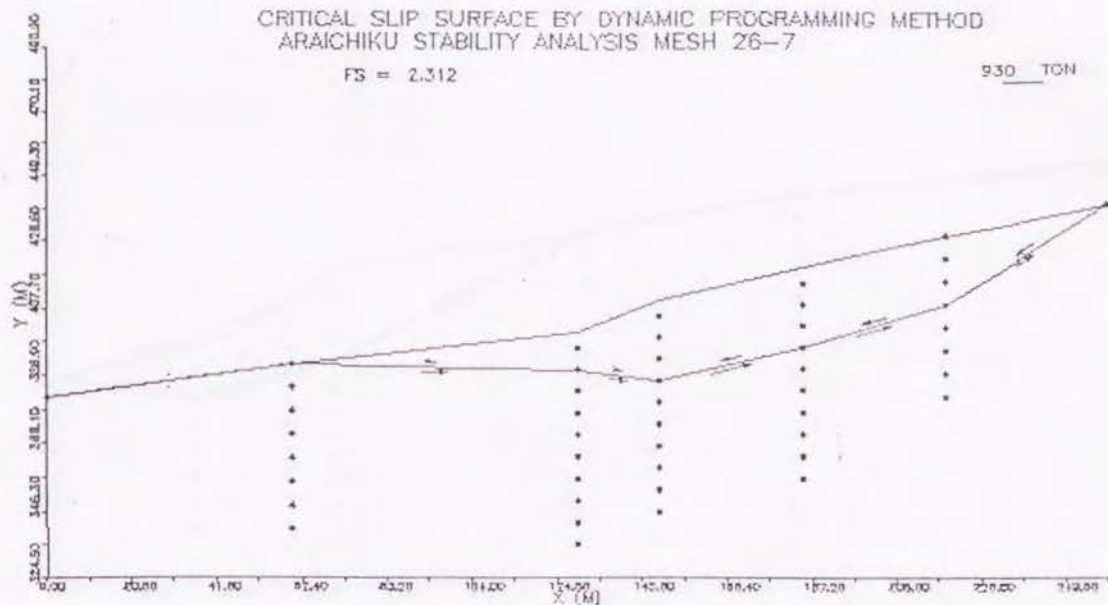
694 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 26-7

FS = 2.312

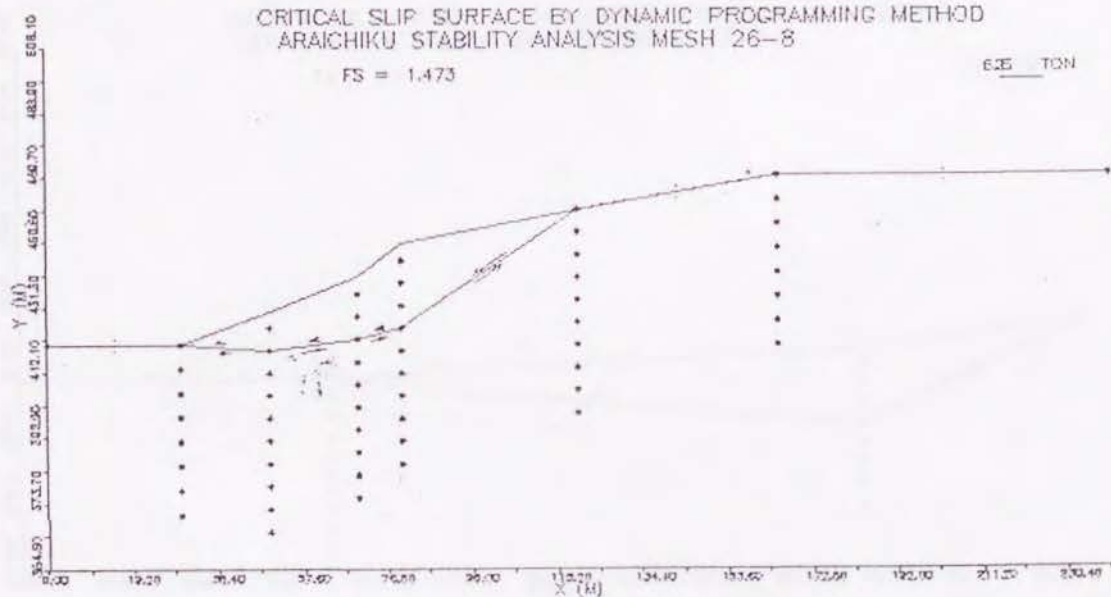
930 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 26-8

FS = 1.473

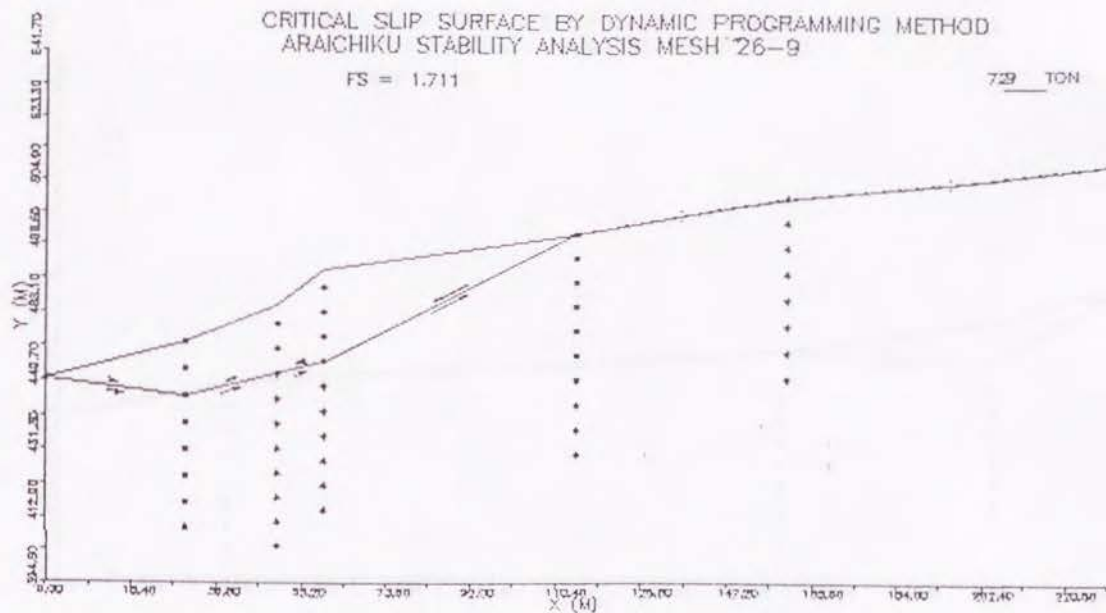
635 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 26-9

FS = 1.711

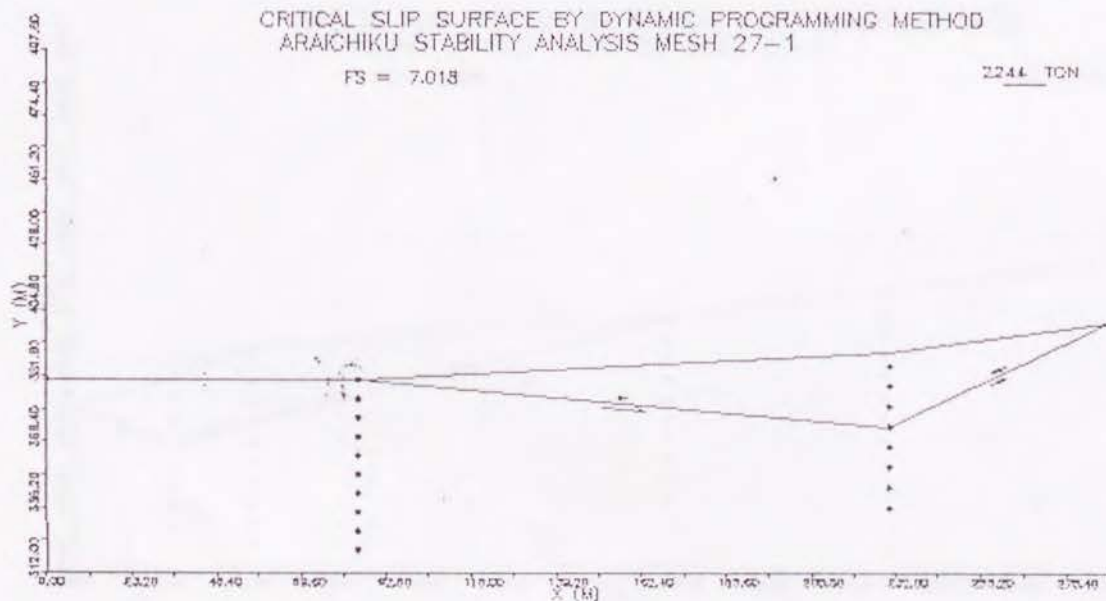
729 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 27-1

FS = 7.018

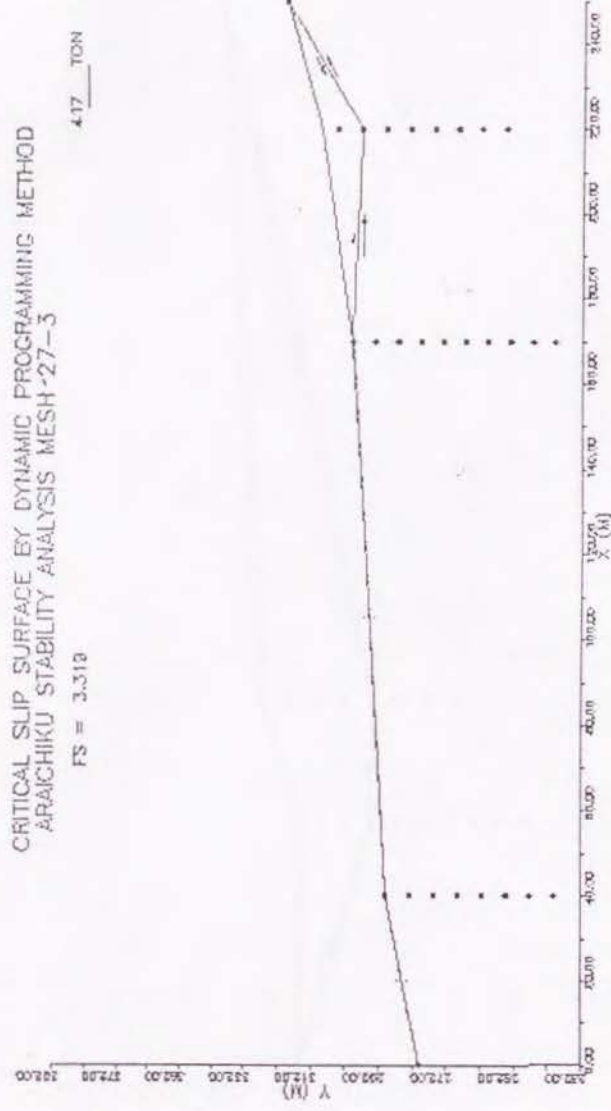
2244 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARACHIKU STABILITY ANALYSIS MESH-27-3

FS = 3.312

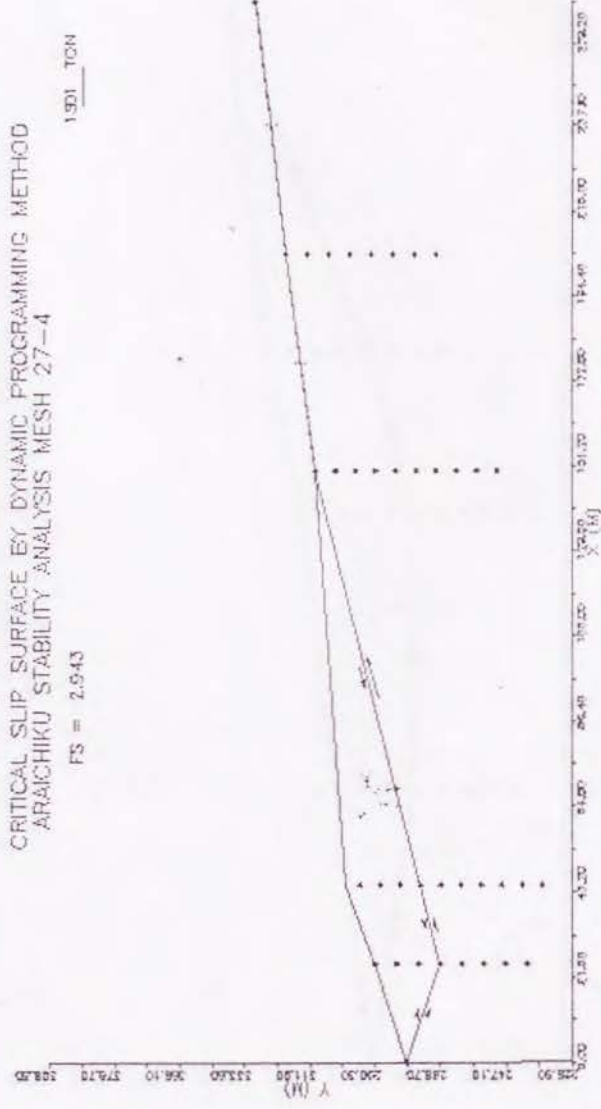
4.17 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARACHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 27-4

FS = 2.943

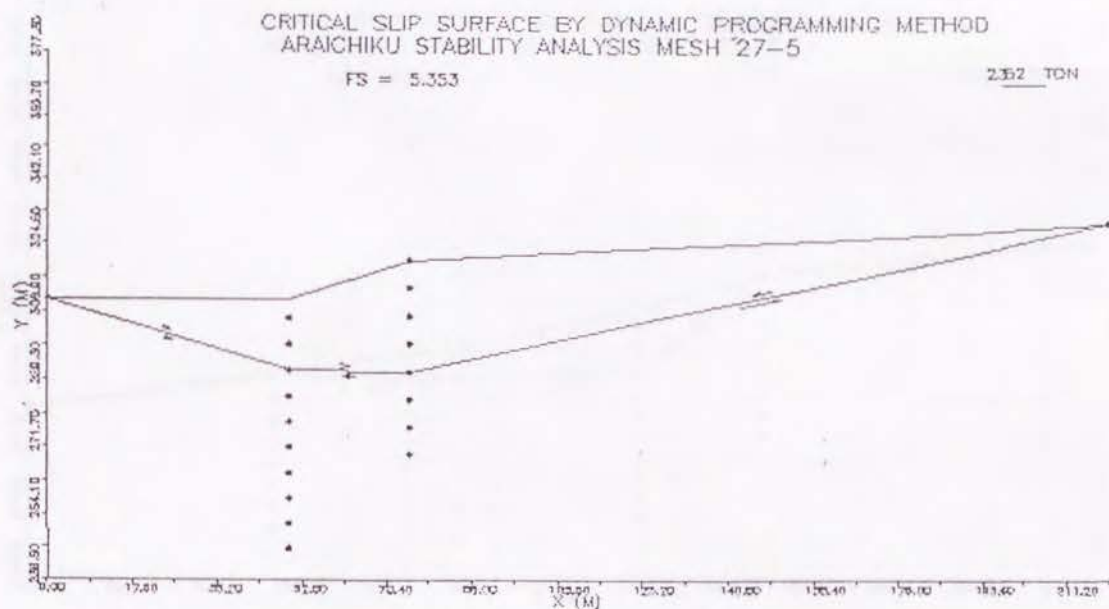
1.901 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 27-5

FS = 5.353

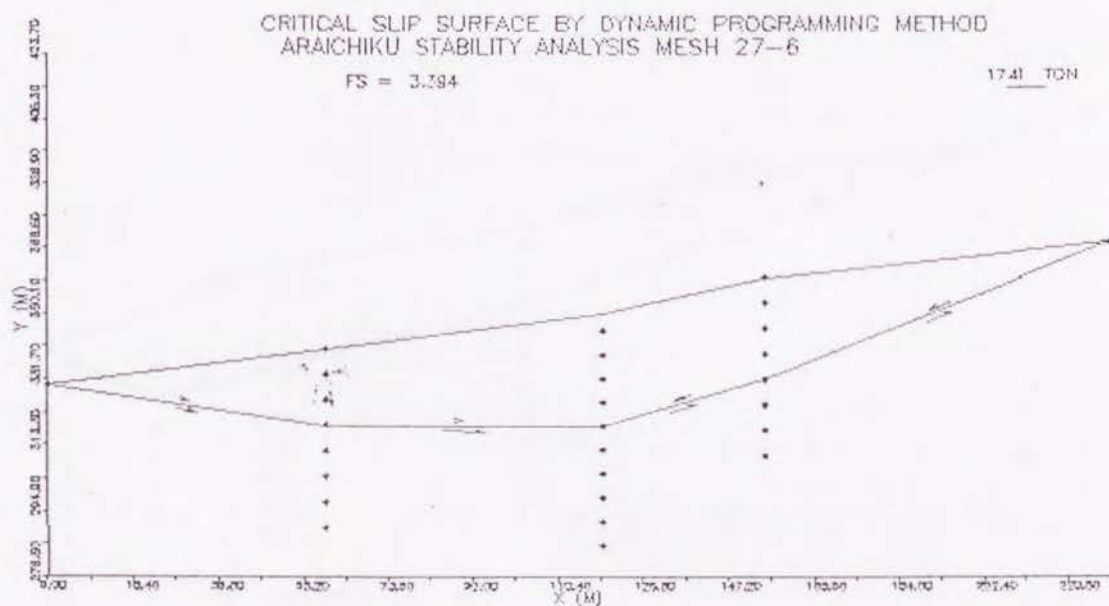
2.352 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 27-6

FS = 3.194

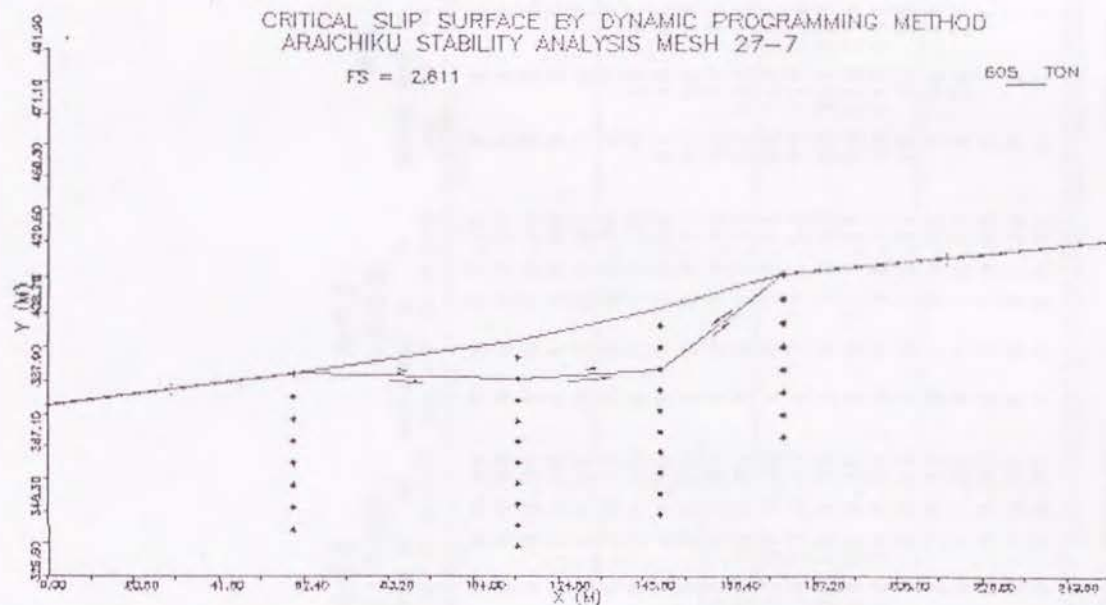
17.41 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 27-7

FS = 2.611

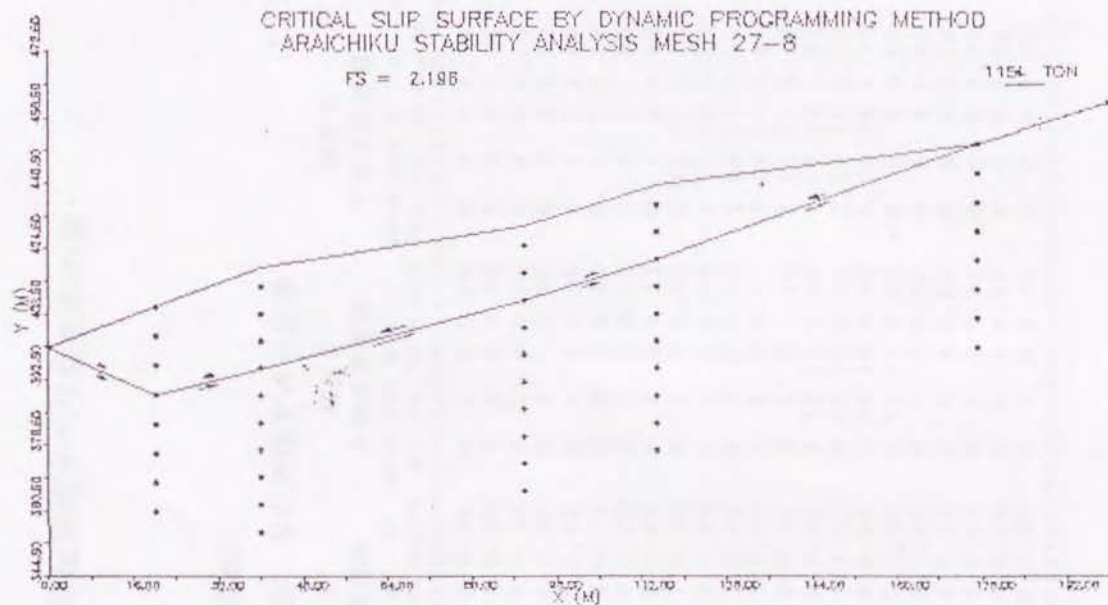
605 TON



CRITICAL SLIP SURFACE BY DYNAMIC PROGRAMMING METHOD
ARAICHIKU STABILITY ANALYSIS MESH 27-8

FS = 2.196

1154 TON



5. 地質別・勾配別地すべり発生率の表

長岡地区

地質別・勾配別地すべり比率

地質区分 勾配 (°)	地質1 第四紀堆積物				地質2 上部魚沼層群				地質3 下部魚沼層群				地質4 灰爪層				地質5 西山層				地質6 椎谷・寺泊層				地質7 火成岩類				合計			
	地すべり	非地す	計	SI	地すべり	非地す	計	SI	地すべり	非地す	計	SI	地すべり	非地す	計	SI	地すべり	非地す	計	SI	地すべり	非地す	計	SI	地すべり	非地す	計	SI	地すべり	非地す	計	SI
	Pc1	ベリ	P1 (Pc1/P1)		Pc1	ベリ	P1 (Pc1/P1)		Pc1	ベリ	P1 (Pc1/P1)		Pc1	ベリ	P1 (Pc1/P1)		Pc1	ベリ	P1 (Pc1/P1)		Pc1	ベリ	P1 (Pc1/P1)		Pc1	ベリ	P1 (Pc1/P1)		Pc1	ベリ	P1 (Pc1/P1)	
0	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
1-2	0	2	2	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	2	2	0.00
3-4	0	1	1	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	2	2	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	3	3	0.00
5-6	0	0	0	0.00	0	1	1	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	1	1	0.00	0	2	2	0.00
7-8	0	0	0	0.00	0	1	1	0.00	0	1	1	0.00	0	3	3	0.00	1	0	1	1.00	0	1	1	0.00	0	0	0	0.00	1	6	7	0.14
9-10	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	1	1	0.00	1	3	4	0.25	0	2	2	0.00	1	1	2	0.50	0	0	0	0.00	2	7	9	0.22
11-12	0	1	1	0.00	0	2	2	0.00	1	0	1	1.00	3	10	13	0.23	3	4	7	0.43	2	0	2	1.00	0	1	1	0.00	9	18	27	0.33
13-14	0	2	2	0.00	1	2	3	0.33	0	3	3	0.00	5	15	20	0.25	2	7	9	0.22	3	3	6	0.50	0	1	1	0.00	11	33	44	0.25
15-16	0	1	1	0.00	0	1	1	0.00	2	15	17	0.12	7	23	30	0.23	10	17	27	0.37	7	2	9	0.78	1	7	8	0.13	27	66	93	0.29
17-18	0	0	0	0.00	0	2	2	0.00	3	12	15	0.20	8	17	25	0.32	13	16	29	0.45	9	22	31	0.29	1	2	3	0.33	34	71	105	0.32
19-20	0	3	3	0.00	0	7	7	0.00	3	18	21	0.14	17	45	62	0.27	25	30	55	0.45	20	39	59	0.34	3	8	11	0.27	68	150	218	0.31
21-22	1	0	1	1.00	1	8	9	0.11	1	20	21	0.05	8	41	49	0.16	19	39	58	0.33	24	33	57	0.42	1	8	9	0.11	55	149	204	0.27
23-24	0	0	0	0.00	0	8	8	0.00	2	19	21	0.10	20	45	65	0.31	30	25	55	0.55	21	32	53	0.40	2	12	14	0.14	75	141	216	0.35
25-26	0	0	0	0.00	0	13	13	0.00	1	19	20	0.05	14	61	75	0.19	24	36	60	0.40	18	30	48	0.38	3	6	9	0.33	60	165	225	0.27
27-28	0	1	1	0.00	0	15	15	0.00	2	21	23	0.09	12	67	79	0.15	12	28	40	0.30	16	28	44	0.36	3	10	13	0.23	45	170	215	0.21
29-30	0	0	0	0.00	0	12	12	0.00	2	16	18	0.11	6	51	57	0.11	6	15	21	0.29	4	12	16	0.25	2	7	9	0.22	20	113	133	0.15
31-32	0	0	0	0.00	0	11	11	0.00	0	9	9	0.00	3	30	33	0.09	3	10	13	0.23	3	4	7	0.43	1	6	7	0.14	10	70	80	0.13
33-34	0	0	0	0.00	0	9	9	0.00	0	4	4	0.00	0	21	21	0.00	0	4	4	0.00	1	2	3	0.33	0	2	2	0.00	1	42	43	0.02
35-36	0	0	0	0.00	0	4	4	0.00	0	0	0	0.00	2	19	21	0.10	0	2	2	0.00	1	0	1	1.00	0	1	1	0.00	3	26	29	0.10
37-38	0	0	0	0.00	0	2	2	0.00	0	0	0	0.00	0	4	4	0.00	0	1	1	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	7	7	0.00
39-40	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	1	1	0.00	0	1	1	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	2	2	0.00
41-42	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	1	1	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	1	1	0.00

西山層計385

寺泊・椎谷層計339

合計1,665

55:385-0.143

9:339-0.027

57:1,665-0.0342

385:1,665-0.231

339:1,665-0.204

9:1,665-0.00541

新井地区

地質別・勾配別地すべり比率

勾配 (°)	地質1 第四紀堆積物				地質2 上部魚沼層群				地質3 下部魚沼層群				地質4・5 灰爪・西山層				地質6 椎谷・寺泊層				地質7 火成岩類				合計			
	地すべり PcLi	非地すべり ベリ	計 PI	SI (PcLi/PI)	地すべり PcLi	非地すべり ベリ	計 PI	SI (PcLi/PI)	地すべり PcLi	非地すべり ベリ	計 PI	SI (PcLi/PI)	地すべり PcLi	非地すべり ベリ	計 PI	SI (PcLi/PI)	地すべり PcLi	非地すべり ベリ	計 PI	SI (PcLi/PI)	地すべり PcLi	非地すべり ベリ	計 PI	SI (PcLi/PI)	地すべり PcLi	非地すべり ベリ	計 PI	SI (PcLi/PI)
	PcLi	ベリ	PI	(PcLi/PI)	PcLi	ベリ	PI	(PcLi/PI)	PcLi	ベリ	PI	(PcLi/PI)	PcLi	ベリ	PI	(PcLi/PI)	PcLi	ベリ	PI	(PcLi/PI)	PcLi	ベリ	PI	(PcLi/PI)	PcLi	ベリ	PI	(PcLi/PI)
0	0	1	1	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	1	1	0.00
1-2	0	1	1	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	1	1	0.00	0	0	0	0.00	0	1	1	0.00	0	3	3	0.00
3-4	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	2	2	0.00	0	0	0	0.00	1	1	2	0.50	0	0	0	0.00	1	3	4	0.25
5-6	0	0	0	0.00	0	1	1	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	1	5	6	0.17	0	4	4	0.00	1	10	11	0.09
7-8	0	1	1	0.00	0	11	11	0.00	1	1	2	0.50	0	2	2	0.00	12	27	39	0.31	0	10	10	0.00	13	52	65	0.20
9-10	0	0	0	0.00	1	12	13	0.08	0	1	1	0.00	0	2	2	0.00	17	35	52	0.33	0	5	5	0.00	18	55	73	0.25
11-12	0	0	0	0.00	0	18	18	0.00	0	6	6	0.00	0	3	3	0.00	35	40	75	0.47	0	3	3	0.00	35	70	105	0.33
13-14	0	0	0	0.00	3	18	21	0.14	1	4	5	0.20	3	10	13	0.23	0	0	0	0.00	38	38	76	0.50	0	5	5	0.00
15-16	0	1	1	0.00	1	32	33	0.03	3	17	20	0.15	1	28	29	0.03	0	0	0	0.00	63	70	133	0.47	0	8	8	0.00
17-18	0	0	0	0.00	1	14	15	0.07	6	9	15	0.40	5	16	21	0.24	0	0	0	0.00	30	41	71	0.42	0	8	8	0.00
19-20	2	1	3	0.67	0	15	15	0.00	4	27	31	0.13	11	44	55	0.20	0	0	0	0.00	35	53	88	0.40	2	13	15	0.13
21-22	0	0	0	0.00	1	13	14	0.07	1	24	25	0.04	5	32	37	0.14	0	0	0	0.00	18	28	46	0.39	2	11	13	0.15
23-24	0	3	3	0.00	2	20	22	0.09	2	33	35	0.06	11	41	52	0.21	0	0	0	0.00	16	21	37	0.43	1	10	11	0.09
25-26	0	2	2	0.00	2	13	15	0.13	3	29	32	0.09	3	45	48	0.06	0	0	0	0.00	7	16	23	0.30	0	28	28	0.00
27-28	0	1	1	0.00	0	7	7	0.00	1	21	22	0.05	3	37	40	0.08	0	0	0	0.00	3	5	8	0.38	0	34	34	0.00
29-30	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	2	19	21	0.10	3	21	24	0.13	0	0	0	0.00	0	5	5	0.00	1	18	19	0.05
31-32	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	1	14	15	0.07	1	6	7	0.14	0	0	0	0.00	2	1	3	0.67	0	16	16	0.00
33-34	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	1	11	12	0.08	1	6	7	0.14	0	0	0	0.00	1	3	4	0.25	0	9	9	0.00
35-36	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	1	2	3	0.33	0	4	4	0.00	0	0	0	0.00	0	6	6	0.00	0	2	2	0.00
37-38	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	1	3	4	0.25	0	2	2	0.00	0	0	0	0.00	0	2	2	0.00	0	0	0	0.00
39-40	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	1	0	1	1.00	0	1	1	0.00	1	1	2	0.50
41-42	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00

寺泊・椎谷層計677

合計1,665

76:677 0.112

76:1,665 0.0456

677:1,665 0.407

長野県北部地区(1)

第四紀層

火砕岩類

権田礫岩・砂岩層

地質 勾配 (度)	地質 1				地質 3				地質 4			
	地質 PLi	非地質 PLi	計 PLi	Si (PLi/PLi)	地質 PLi	非地質 PLi	計 PLi	Si (PLi/PLi)	地質 PLi	非地質 PLi	計 PLi	Si (PLi/PLi)
1~	1	2	3	0.33	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
3	1	3	4	0.25	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
5	1	3	4	0.25	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
7	6	26	32	0.19	0	0	0	0.00	0	1	1	0.00
9	1	8	9	0.11	0	0	0	0.00	0	1	1	0.00
11	2	12	14	0.14	1	1	2	0.50	1	3	4	0.25
13	3	15	18	0.17	1	0	1	1.00	6	4	10	0.60
15	0	16	16	0.00	0	1	1	0.00	7	15	22	0.32
17	2	14	16	0.13	1	2	3	0.33	7	6	13	0.54
19	1	15	16	0.06	1	3	4	0.25	17	24	41	0.41
21	3	17	20	0.15	5	3	8	0.63	39	32	71	0.55
23	1	6	7	0.14	3	3	6	0.50	15	22	37	0.41
25	0	9	9	0.00	9	6	15	0.60	26	23	49	0.53
27	0	4	4	0.00	10	15	25	0.40	15	25	40	0.38
29	0	4	4	0.00	3	13	16	0.19	10	29	39	0.26
31	0	4	4	0.00	2	18	20	0.31	3	21	24	0.13
33	0	0	0	0.00	4	19	23	0.17	4	6	10	0.4
35	0	0	0	0.00	5	21	26	0.19	2	5	7	0.29
37	0	0	0	0.00	4	23	27	0.15	0	6	6	0.00
39	0	0	0	0.00	1	13	14	0.07	0	1	1	0.00
41	0	0	0	0.00	0	9	9	0.00	0	1	1	0.00
43	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
45	0	0	0	0.00	0	2	2	0.00	0	0	0	0.00

長野県北部地区(2) 高府泥岩層 境ノ宮・千現砂岩・泥岩層

地質 区分 勾配 (度)	地質 5				地質 6				合 計			
	地質 P _{Li}	非地質 P _{Li}	計 P _{Li}	S _L (P _{Li} /P _{Li})	地質 P _{Li}	非地質 P _{Li}	計 P _{Li}	S _L (P _{Li} /P _{Li})	地質 P _{Li}	非地質 P _{Li}	計 P _{Li}	S _L (P _{Li} /P _{Li})
1~	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	1	2	3	0.33
3	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	1	3	4	0.25
5	1	0	1	1.00	0	0	0	0.00	2	3	5	0.40
7	3	0	3	1.00	0	0	0	0.00	9	21	30	0.30
9	5	0	5	1.00	1	0	1	1.00	7	8	15	0.47
11	12	3	15	0.80	1	0	1	1.00	17	13	30	0.57
13	17	5	22	0.77	1	2	3	0.33	27	23	60	0.45
15	16	5	21	0.76	4	4	8	0.50	27	41	68	0.40
17	25	13	38	0.66	6	1	7	0.86	41	36	77	0.53
19	66	26	92	0.72	14	8	22	0.64	99	76	175	0.57
21	68	33	101	0.67	33	6	39	0.85	148	88	236	0.63
23	37	18	55	0.67	16	7	23	0.50	72	56	128	0.56
25	50	37	87	0.57	18	9	27	0.67	113	84	197	0.57
27	31	20	51	0.61	19	10	29	0.66	75	74	149	0.50
29	28	19	47	0.60	22	6	28	0.79	63	71	134	0.47
31	16	16	32	0.50	12	5	17	0.71	39	64	103	0.38
33	6	6	12	0.50	15	1	16	0.94	29	32	61	0.48
35	1	3	4	0.25	5	4	9	0.56	13	33	46	0.28
37	2	3	5	0.40	2	1	3	0.67	8	33	41	0.20
39	0	0	0	0.00	1	2	3	0.33	2	15	17	0.12
41	1	0	1	1.00	1	0	1	1.00	2	10	12	0.17
43	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
45	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	2	2	0.00

高府泥岩層計592

境ノ宮・千現砂岩・泥岩層計237

合計1,593

$$(592+237)/1,593 \quad 0.520$$

$$(5+16)/(592+237) \quad 0.0253$$

$$592/1,593 \quad 0.372$$

$$(5+16)/1,593 \quad 0.0132$$

$$237/1,593 \quad 0.149$$

地質 勾配(度)	玄武岩				第三紀層				第四紀層				合計	
	地 質	非 P ₁	Si (High)	Si (High)	地 質	非 P ₁	Si (High)	Si (High)	地 質	非 P ₁	Si (High)	Si (High)	地 質	非 P ₁
1~	0	0	—	—	5	5	0.17	0.03	22	20	0.03	0.03	25	25
3~	0	1	0.00	0.00	14	2	0.14	0.02	25	24	0.02	0.11	27	41
5~	1	3	0.25	0.25	22	38	0.27	0.11	12	15	0.11	0.23	27	74
7~	0	21	0.00	0.00	111	42	0.57	0.19	26	21	0.19	0.43	29	69
9~	7	26	0.21	0.21	114	46	0.60	0.13	8	7	0.13	0.49	77	125
11~	10	23	0.30	0.30	114	54	0.53	0.00	5	5	0.00	0.46	22	122
13~	18	27	0.40	0.40	164	68	0.59	0.29	7	5	0.29	0.54	100	216
15~	14	17	0.45	0.45	98	51	0.48	—	0	0	—	0.47	52	129
17~	9	20	0.31	0.31	94	31	0.47	—	0	0	—	0.59	51	123
19~	23	17	0.58	0.58	127	67	0.47	—	0	0	—	0.50	24	167
21~	12	8	0.60	0.60	72	45	0.52	—	0	0	—	0.42	53	72
23~	2	6	0.57	0.57	35	22	0.59	0.00	1	1	0.00	0.43	29	51
25~	2	6	0.57	0.57	25	8	0.68	—	0	0	—	0.64	14	33
27~	5	4	0.56	0.56	19	5	0.74	—	0	0	—	0.68	7	22
29~	1	2	0.33	0.33	4	3	0.25	—	0	0	—	0.29	5	7
31~	1	0	1.00	1.00	4	3	0.25	—	0	0	—	0.40	3	5
33~	0	0	—	—	0	0	—	—	0	0	—	—	0	0
35~	0	0	—	—	1	1	0.00	—	0	0	—	0.00	1	1

合計1,526

第四紀層計173

第三紀層計1,055

玄武岩計298

19:1,526-0.0125 19:1,055-0.018 1,055:1,526 0.691